

성장정지효과에 의한 InGaAs/InP 양자우물구조의 Photoluminescence 특성 변화

문영부 · 이태완 · 김대연 · 윤의준 · 유지범*

서울대학교 재료공학부 및 반도체 공동연구소
*성균관대학교 재료공학과
(1997년 11월 24일 접수)

Effects of growth interruption on the photoluminescence characteristics of InGaAs/InP quantum wells

Youngboo Moon, Tae-Wan Lee, Daeyeon Kim, Euijoon Yoon, and Ji-Beom Yoo*

*Semiconductor Materials and Processing Laboratory
Schools of Materials Science and Engineering & Inter-university Semiconductor Research Center
Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

**Department of Materials Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon 440-746, Korea
(Received November 24, 1997)*

요 약 - 저압 MOCVD 방법을 이용하여 InGaAs/InP 양자우물구조를 성장하였다. 성장 정지 시간에 따른 photoluminescence 특성의 변화를 통하여 계면구조를 분석하였다. InP 표면을 PH_3 분위기로, InGaAs 표면을 AsH_3 분위기로 유지하며 성장을 정지하는 경우에는 성장 정지 시간이 길어짐에 따라 불순물 유입에 의한 것으로 생각되는 PL 반가폭의 증가를 관찰하였다. InP 표면에 AsH_3 을 공급하는 경우에는 As-P 교환에 의해 우물층 두께가 증가하여 PL 피크가 저에너지로 이동하였고, 반가폭의 변화는 크지 않았다. 계면 양자우물구조를 형성하여 As-P 교환작용에 대해 조사하였고, 1-2 monolayer가 InAs 유효두께로 계산되었다. InGaAs 표면에 PH_3 을 공급한 결과, PL 피크가 고에너지로 이동하는 것을 관찰하였고 동시에 반가폭도 증가하였다. 이는 메모리 효과에 의해 InP 층으로의 As 침투를 억제하고, InGaAs 표면에서의 국부적인 As-P 교환에 의한 것으로 생각된다.

Abstract - The InGaAs/InP quantum wells (QWs) were grown by low pressure metalorganic chemical vapor deposition and the effects of growth interruption steps on their interfacial structures were investigated by measuring photoluminescence spectra. When InP or InGaAs surface was treated under the same group V ambient, the full width at half maximum (FWHM) of the QW peak increased possibly due to the incorporation of impurities during the growth interruption time. When InP surface was treated under AsH_3 , however, the PL peak showed red-shift due to the As-P exchange reaction and the change of FWHM was not remarkable. The effective thickness of InAs interfacial layer formed during AsH_3 treatment on the InP surface was calculated to be 1~2 monolayers. In the case of InGaAs treatment under PH_3 , the PL peak energy and the FWHM increased. This results suggest that PH_3 treatment on the InGaAs surface suppresses the incorporation of As into the subsequent InP layer and the local replacement of As by P occurs simultaneously.

1. 서 론

최근 양자효과를 이용하여 다양한 기능을 가지는 소자를 개발하려는 연구가 많이 진행되고 있으며 1차원적

으로 제한된 구조인 양자우물(quantum well) 구조는 이미 폭넓게 연구되고 있는 구조로서 실용화 단계에 있다 [1, 2]. 이중 InGaAs/InP 양자우물구조는 광통신과 관련된 1.3-1.55 μm 영역을 포함하고 있으며 InGaAs의 빠른

전자이동도에 의한 전기적 전달 특성도 우수하므로 광소자 및 전자소자와 광전자 집적소자 등에 많은 응용범위를 가지고 있다[3-6]. 특히 InGaAs/GaAs 양자우물구조가 큰 격자불일치에 의한 높은 결합농도와 같은 구조적 문제[7, 8]를 가지고 있음에 비해, InGaAs/InP는 격자일치된 양자우물구조를 성장할 수 있으므로 우수한 소자 특성을 얻을 수 있다. 또한 격자일치 조성을 중심으로 strain을 자유롭게 조절할 수 있으므로 현재 많은 관심을 끌고 있는 변형 양자우물(strained quantum well) 등에 널리 사용될 수 있다[9, 10].

양자우물구조는 20 Å 이하의 두께를 가지는 우물층을 요구하므로 정확한 두께의 조절과 조성 및 두께의 균일성 등이 요구된다. 광통신과 관련하여 많은 연구가 진행되고 있는 1.55 μm 파장을 가지는 InGaAs/InP 양자우물구조의 경우, 60 Å 정도의 우물층 두께를 요구하므로 bulk의 특성보다 계면의 특성에 의해 양자우물구조의 특성이 결정되며 우물층의 두께가 작아질수록 계면 특성은 더욱 중요해진다. 일반적으로 계면특성은 계면에서의 조성변화의 급준성과 계면의 평탄한 정도에 의해 평가된다. 따라서 구조적으로 평탄하고 조성이 계단함수로 변하는 계면을 얻는 것이 중요하다.

Molecular beam epitaxy(MBE), metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD) 등의 성장방법에서 급준한 계면을 얻기 위해 많은 경우 성장정지방법을 이용하고 있다[11-17]. 성장 정지 시간동안의 어닐링 효과에 의해 3차원적으로 성장한 표면을 평탄화시킬 수 있고, InGaAs/InP 양자우물구조와 같이 증기압이 큰 5족 원소의 교환이 일어나는 경우, 성장 정지 시간동안의 표면반응에 의해 조성의 변화를 가져오므로 이를 조절하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다[11-17]. 특히 InGaAs 위에 InP를 성장하는 경우에는 As의 메모리 효과에 의해, 성장되는 InP 층으로 As이 침투하여 급준한 계면을 얻을 수 없는 것으로 보고되고 있다[13, 16].

본 연구에서는 저압 MOCVD 장치를 이용하여 InGaAs/InP 단일 양자우물구조를 성장하고 다양한 성장정지시간의 변화에 따른 양자우물구조의 photoluminescence(PL) 측정을 통해 계면특성의 변화를 관찰하였다.

2. 실험방법

InGaAs/InP 양자우물구조는 저압 MOCVD 방법으로 성장하였고, 반응기체의 빠른 교환과 이때 발생할 수 있

는 유량의 변동을 방지하기 위하여 vent-run manifold 방식을 사용하였다[18, 19]. 기판은 SiC 코팅된 graphite susceptor를 이용하여 고주파에 의한 유도가열방식을 사용하였다. 기판으로는 Sn 도핑된 n형(100) InP를 사용하였다. 기판은 초음파 세척기 안에서 TCE(trichloroethylene), acetone, methanol로 각각 10분간 유기물 세척을 한 후, 5H₂SO₄ : 1H₂O₂ : 1H₂O 용액으로 2분 30초간 식각하여 표면의 오염부분을 제거한 후 반응기에 주입하였다. 성장에 앞서 모든 기판은 620°C에서 5분간 PH₃ 분위기로 in-situ 세정 과정을 거친 후 성장을 시작하였다.

InGaAs/InP 양자우물구조는 모두 620°C의 온도에서 성장되었고, 성장시 반응기의 압력은 76 Torr였으며, 수소 이송기체의 유량은 12 slm으로 일정하게 유지하였다. InP 장벽층의 성장을 위해서 0.141 sccm의 TMIn과 100 sccm의 PH₃을 공급하였고, InGaAs 우물층의 성장을 위해서는 0.132 sccm의 TMGa과 54.6 sccm의 AsH₃을 공급하였으며, TMIn의 유량은 InP 성장의 경우와 같게 0.141 sccm으로 유지하였다. InGaAs 우물층과 InP 장벽층의 두께는 bulk InGaAs와 InP의 성장속도를 이용하여 계산하였다. 2 μm 두께로 성장된 InGaAs와 InP 층으로부터 얻어진 성장속도는 각각, 1.9 Å/sec와 0.88 Å/sec였다.

성장정지효과에 의한 계면특성의 변화를 관찰하기 위하여 PL 측정을 실시하였다. PL 측정에 사용된 레이저는 5145 Å의 파장을 가지는 Ar⁺ 레이저이고, 광검출기로는 액체 질소로 냉각된 Ge 광검출기를 사용하였다. 시편의 온도는 He 기체 순환에 의해 9K의 저온까지 낮출 수 있으며, 측정의 신호 대 잡음비를 높이기 위해서 lock-in 증폭방법을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 양자우물구조의 성장과 에너지 변이량의 계산

성장된 InGaAs/InP 단일양자우물구조는 Fig. 1(a)와 같다. 먼저 1000 Å InP buffer 층을 성장하고, 양자우물층과의 비교를 위해 1000 Å InGaAs 기준층을 성장하였다. 그 위에 각각, 20 Å과 60 Å의 두께를 가지는 InGaAs 우물층을 500 Å InP 장벽층 사이에 성장하였다. 우물층과 장벽층으로 성장된 InP와 InGaAs 에피층은 기존의 연구를 통하여 10¹⁵/cm³ 이하의 낮은 전자농도와 9K에서 3 meV 이하의 PL 반가폭을 보이는 우수한 광학적 특성을 가지고 있음을 확인하였다[18, 19]. 또한 기준

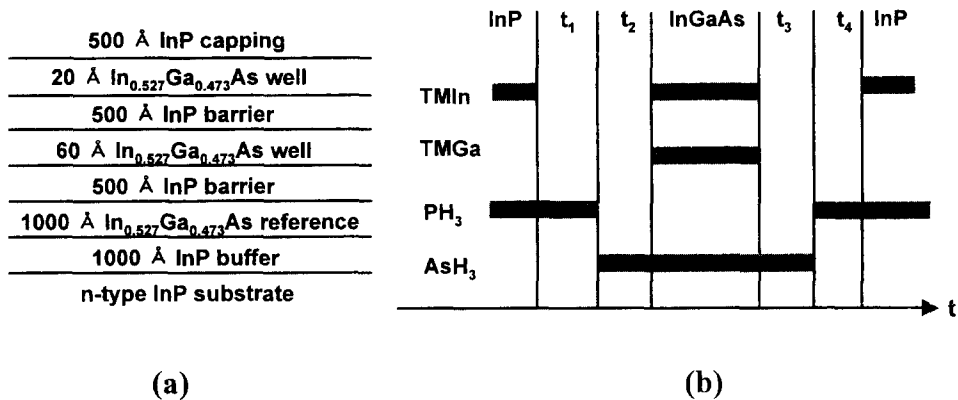


Fig. 1. (a) Structure of InGaAs/InP SQWs and (b) schematic view of growth interruption steps.

층 및 우물층으로는 InP 기판에 격자일치된 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.527$) 에피층을 사용하였다. 성장정지 시간에 따른 계면특성의 변화와 이에 따른 PL 스펙트럼의 변화를 분석하기 위하여 우물층과 장벽층의 성장사이에 Fig. 1(b)와 같이 정의된 t_1, t_2, t_3, t_4 성장 정지 시간을 두었다.

먼저 성장된 20 Å과 60 Å 두께의 두 우물층을 가지는 InGaAs/InP 양자우물구조에 대해 PL 측정을 통하여 양자효과에 의한 에너지 변이량을 실험적으로 구하였으며 이를 transfer matrix 방법을 사용하여 이론적으로 계산된 에너지 변이량과 비교하였다[20, 21]. 이때 계산을 위해 사용된 상수들은 Table 1에 정리하여 나타내었다. 20 Å 보다 큰 두께를 가지는 우물층의 경우, 계산을 통해 얻어진 변이량과 실험값은 Fig. 2에서와 같이 잘 일치하는 결과를 보인다. 이후에 성장된 우물층은 두께를 Fig. 1과 같이 20 Å과 60 Å으로 일정하게 유지하였고, 성장

정지시간에 따른 PL 스펙트럼의 변화를 측정하였다.

3.2 성장정지효과에 의한 광학적 특성의 변화

양자우물구조의 계면특성에 대한 성장 정지 단계의 효과를 알아보기 위해 앞에서 정의된 t_1, t_2, t_3, t_4 시간을 변화시키며 광학적 특성의 변화를 지은 PL 측정을 통해 관찰하였다. 먼저 InP와 InGaAs를 성장한 후, 각각 PH_3 과 AsH_3 만을 공급하며 어닐링을 통한 표면 평탄화가 진행되는[12, 15-17] t_1 과 t_3 시간에 따른 PL 특성의 변화를 관찰하였다. 이때 t_1 과 t_3 시간을 동시에 변화시켰으며 t_2

Table 1. Parameters for the calculation of e1-h11 quantum confinement energy of InGaAs/InP QW and InAs/InP QW by the transfer matrix method. a and b represent hydrostatic and shear valence band deformation potential, respectively. Here * values are for the strained case

Parameters	InAs[24]	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ [22]	InP[22]
E_g (eV)	0.472*	0.812	1.424
m_c (m_0)	0.0325*	0.141	0.076
m_{hh} (m_0)	0.35	0.5	0.6
a_0 (Å)	6.0583		5.8687[24]
C_{11} (10^{10} Pa)	8.33		10.22[24]
C_{12} (10^{10} Pa)	4.53		5.76[24]
a (eV)	-6		-6.4[24]
b (eV)	-1.8		-2[24]

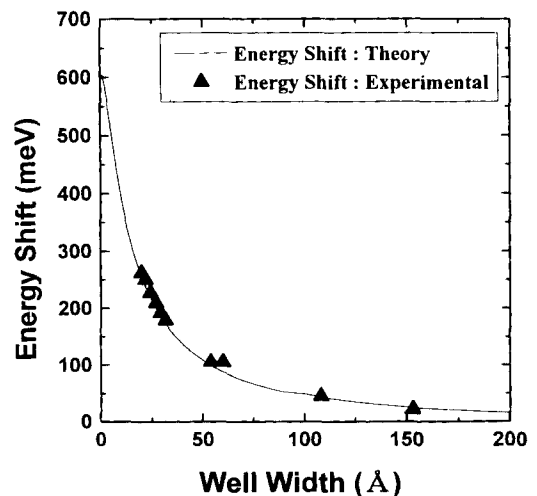


Fig. 2. Quantum confinement energy change with well thickness. To calculate theoretical value effective mass approximation method was used and $\Delta E_c/\Delta E_v$ was chosen as 40 : 60.

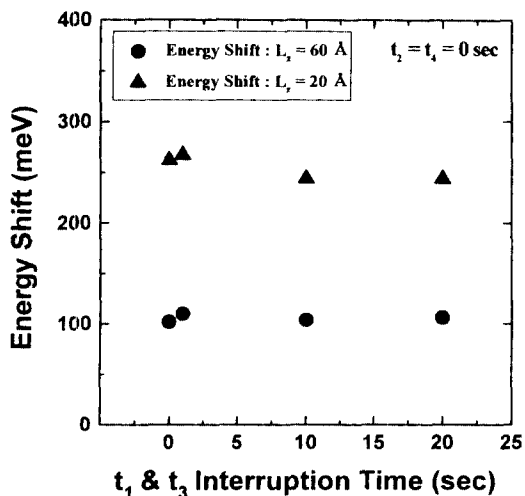


Fig. 3. Effects of growth interruption time of t_1 and t_3 on the energy shift of QW. t_2 and t_4 time were changed simultaneously and t_2 and t_4 time were 0 sec.

와 t_4 시간은 모두 0초로 일정하게 유지하였다. t_1 과 t_3 시간을 0초에서 20초까지 변화시킨 결과, Fig. 3에서 알 수 있는 것처럼 60 Å와 20 Å 양자우물로부터 얻어진 에너지 변이값은 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나 반가폭의 경우에는 Fig. 4와 같이 10초까지의 성장정지 시간동안에는 큰 변화를 보이지 않았으나 20초로 성장 정지 시간이 길어지자 현저한 증가추세를 보였다.

InP와 InGaAs 표면에 각각, PH_3 과 AsH_3 만을 공급하며 성장을 정지하는 경우에는 두가지의 반응이 주되게 일어날 것으로 생각된다. 하나는 표면의 In과 Ga 원자들이 확산을 통해 보다 안정한 위치로 찾아가는 표면의 평탄화 반응으로 계면특성을 향상 시키는데 기여하게 되고, 이와 동시에 주변으로부터 표면으로 유입되는 불순물이 성장정지 시간동안 에피층 표면에 흡착되므로 계면부분의 불순물 농도가 증가하여 계면특성을 저하시키게 된다. 표면 평탄화 반응과 계면의 불순물 흡착과정은 양자우물층의 두께와 조성에 영향을 미치지 않으므로 두 반응으로 인한 에너지 변이량은 Fig. 3에서와 같이 거의 변화하지 않았다. 그러나 이 두반응은 PL 반가폭에 상반된 영향을 미치게 된다. Fig. 4에서 볼 수 있는 반가폭의 증가는 성장정지 시간이 길어짐에 따라 표면 불순물 농도가 증가하고 따라서 불순물 준위에서의 광전이가 증가하기 때문으로 생각된다[17]. 평탄화의 효과가 상대적으로 미약한 것은, 알려진대로 MOCVD 성장

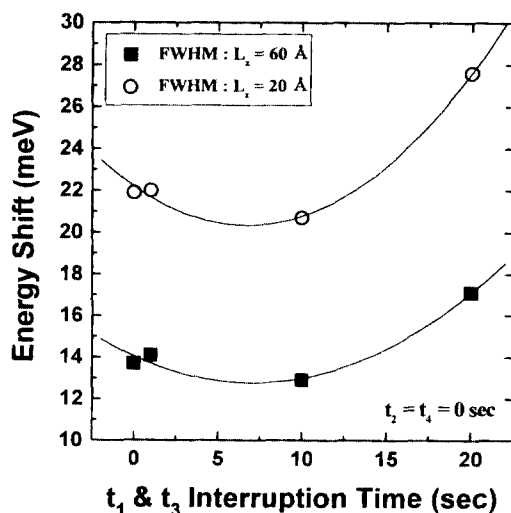


Fig. 4. Effects of growth interruption time of t_1 and t_3 on the FWHM of QW. t_2 and t_4 time were changed simultaneously and t_2 and t_4 time were 0 sec.

에서는, 표면의 평탄화를 위해 수 분단위의 성장정지가 필요한 MBE에 비해 표면 원자의 이동도가 매우 크므로 [12, 17, 23] 우리의 실험에서와 같이 성장속도가 낮은 경우에는 2차원 성장모드로 성장이 이루어져 충분히 평탄화된 에피층이 성장되기 때문으로 생각된다[23].

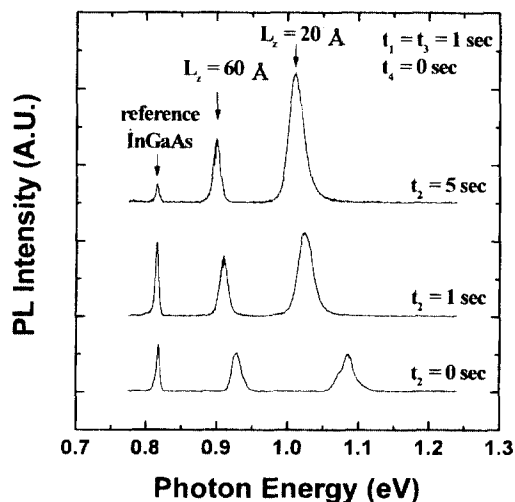


Fig. 5. Effects of growth interruption time of t_2 on the energy shift of QW. The red shift of energy between $t_2=0$ sec and $t_2=5$ sec is 72 meV for 20 Å well and 26 meV for 60 Å well. t_1 and t_3 time were 1 sec and t_4 time was 0 sec.

다음으로 t_1 과 t_3 시간을 1초, t_4 시간을 0초로 유지하며 t_2 시간에 따른 PL 특성의 변화를 관찰하였다. t_2 시간을 5초까지 증가시키며 성장한 경우, Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼 양자우물층으로부터의 PL 피크가 저에너지 쪽으로 이동하는 현상이 관찰되었다. PL 피크의 에너지 변화량은 20 Å 양자우물층의 경우, 1초일 때 60 meV, 5초일 때 74 meV이고, 60 Å 양자우물층의 경우에는 1초일 때 15.4 meV, 5초일 때 26 meV이다. t_2 시간에 따른 반가폭은, Fig. 6에서와 같이 20 Å 양자우물의 경우에는 약간의 증가를 60 Å 양자우물의 경우에는 약간의 감소를 보이며 일정한 경향성을 나타내지 않았고 변화량도 각각, 2.8 meV와 2 meV로 매우 작은 값을 보였다. 따라서 t_2 성장정지 시간의 주된 효과는 PL 피크 에너지의 감소이며 이는 t_2 성장정지 시간동안의 계면구조의 변화와 관련된 것으로 생각된다.

InP/InGaAs/InP 양자우물구조의 [100] 성장방향으로

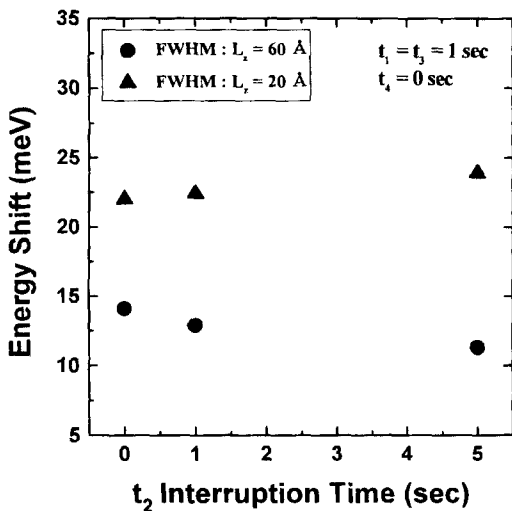


Fig. 6. Effects of growth interruption time of t_2 on the FWHM of QW. t_1 and t_3 time were 1 sec and t_4 time was 0 sec.

의 이상적인 원자배열은 Fig. 7과 같이 간략하게 나타낼 수 있다. InP 성장후의 t_1 시간 동안의 PH_3 공급과 InGaAs 성장후의 t_3 시간 동안의 AsH_3 공급에 의해 각각의 표면은 P 원자와 As 원자에 의해 보호되어 Fig. 7과 같은 원자배열을 가지게 된다. P에 의해 보호된 InP 표면에 t_2 시간 동안 AsH_3 을 공급하게 되면 InP 표면의 몇 원자층에 걸쳐 As과 P의 교환이 일어나게 된다. 이러한 As-P 교환작용은 일반적인 성장온도인 600~700°C의 온도범위에서 상대적으로 불안정한 P가 보다 안정한 As으로 치환되기 때문에 발생하게 된다[13, 16]. As-P 교환작용에 의해 InP 표면에 보다 작은 에너지 갭을 가지는 $\text{InP}_{1-x}\text{As}_x$ 가 형성되고 그 위에 InGaAs가 성장되면 양자우물층의 두께가 증가하는 효과를 가져오게 된다. 따라서 t_2 시간이 길어짐에 따라 양자우물층의 두께는 더욱 두꺼워져서 PL 피크가 저에너지 쪽으로 이동한다. As-P 교환작용에 의한 PL 피크 에너지의 변화량은 20 Å과 60 Å 양자우물에 대해 각각 초기 1초 동안에 전체 5초 동안의 변화량의 81%와 59%가 일어났다. 이 결과는 As-P 교환작용이 매우 짧은 시간동안에 효과적으로 일어나는 반응임을 암시한다.

InP 표면이 AsH_3 분위기에 노출되어 형성되는 표면의 $\text{InP}_{1-x}\text{As}_x$ 층에 대해 더욱 자세히 알아보기 위해 $\text{InP}_{1-x}\text{As}_x$ 계면 양자우물구조를 성장하였다. 계면 양자우물구조는 600°C의 온도에서 InP 기판위에 3000 Å의 InP 버퍼층을 성장한 후, TMIn의 공급을 중단하고 50 sccm의 AsH_3 만을 1초에서 10초의 시간 동안 공급하여 표면에 얇은 $\text{InP}_{1-x}\text{As}_x$ 층을 형성한 후 다시 500 Å의 InP 층을 성장하여 형성하였다. Fig. 8은 AsH_3 공급 시간에 따른 PL 스펙트럼의 변화를 보여주고 있다. AsH_3 을 공급하지 않고, InP 층만을 성장한 경우에는 1.417 eV에서 BE(bound exciton) 피크가 보인다. 그러나 AsH_3 을 공급하여 계면에 $\text{InP}_{1-x}\text{As}_x$ 층을 형성한 경우에는 더 이상 InP 층의 BE 피크를 관찰할 수 없고 계면 양자우물층으로부터의 피크가 관찰된다. AsH_3 공급시간이 1초

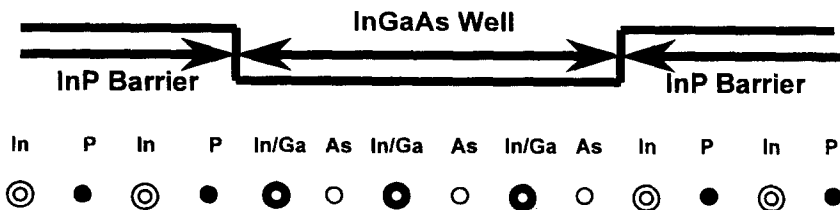


Fig. 7. Schematic diagram of interfacial atomic structure of InP/InGaAs/InP QW.

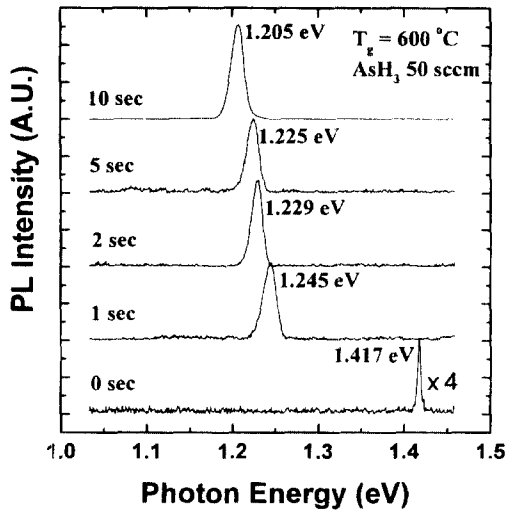


Fig. 8. Effects of AsH₃ purge time on the energy of InP/InAsP/InP interface quantum well formed during AsH₃ purge time.

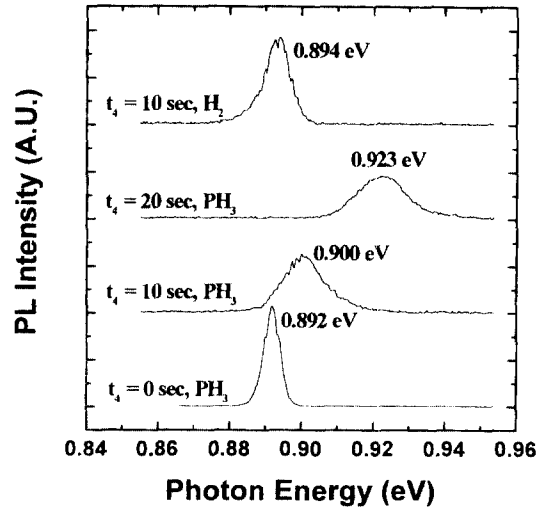


Fig. 9. Effects of growth interruption time of t_1 on the PL spectrum of InGaAs/InP QW. t_1 and t_2 time were 0 sec and t_3 time was 5 sec.

에서 10초까지 증가함에 따라 PL 피크는 저에너지로 이동하고 있으며 이 결과는 AsH₃ 공급시간이 길어짐에 따라 계면에 형성되는 InP_{1-x}As_x 층의 두께와 As 물분율의 증가를 반영하고 있다. 계면 양자우물층이 형성된 모든 시편의 경우, 양자우물층이 형성되지 않은 시편에 비해 양자효과에 의한 PL 피크 강도의 증가를 볼 수 있으며, AsH₃ 공급시간의 변화에 따른 피크 강도의 변화는 거의 없다.

앞에서 언급된 계면양자우물층의 조성이 InAs라고 가정하고 우물층의 유효 두께를 계산하였다. 계산은 앞에서 사용한 transfer matrix 방법을 사용하였고, InAs 층은 InP 층과 격자상수가 다르므로 strain에 의한 효과를 고려하였다[24]. 위의 계산으로부터 얻어진 InAs 우물층의 유효두께는 1초 동안 AsH₃을 공급한 시편의 경우, 1.5 ML(monolayer)이고, 10초 동안 AsH₃을 공급한 시편의 경우 2 ML이다. 참고로 InAs 1 ML는 3 Å이다. 이 계산결과는 InP 표면에 형성되는 InAs 층이 초기의 짧은 시간동안 대부분 형성되고 그 이후의 AsH₃ 공급시간 동안의 InAs 층 유효두께의 증가는 크지 않음을 보여준다. 이러한 결과는 초기 1초 동안 InP 표면의 P 층이 As 층으로 급속하게 대체되고 이때 형성된 약 1 ML 두께의 InAs 층에 의해 아래의 InP 층이 더이상의 As-P 교환반응으로부터 효과적으로 보호되고 있기 때문이다. 600°C의 온도에서 As과 P의 상호확산계수는 매우 작으

므로[25] AsH₃ 공급시간 동안의 확산에 의한 As 농도의 증가는 거의 무시할 수 있을 것으로 생각된다.

InAs 계면 양자우물에서 얻어진 PL 피크의 반가폭은 15-18 meV 사이에서 거의 변화하지 않았다. 이 결과는 앞의 Fig. 6에서 얻어진 결과와 잘 일치하는 결과로 As-P 교환반응이 계속 진행되더라도 계면특성이 크게 나빠지지 않는다는 것을 보여준다. 즉, As과 P 원자간의 열 안정성 차이가 크기 때문에 표면에 노출된 대부분의 P가 빠르게 As으로 교환되어 균일한 계면을 형성하고 이때 형성된 InAs에 의해 더이상의 교환작용이 억제되기 때문으로 생각된다.

t_1 시간과 t_2 시간을 0초, t_3 시간을 5초로 유지하고 t_4 시간 동안의 성장정지에 따른 PL 특성의 변화를 관찰하였다. Fig. 9에서 알 수 있는 것처럼 InGaAs 성장 후, PH₃을 공급하는 시간인 t_4 시간이 길어짐에 따라 양자우물층의 PL 피크가 고에너지 쪽으로 이동하였다. 이 결과는 P에 의해 As이 치환되면 치환된 부분의 에너지 갭이 증가하여 우물층의 유효 두께가 감소하므로, 우물층 유효 두께의 감소에 의해 PL 피크가 고에너지 쪽으로 이동한 것으로 생각된다. 그러나, 이때 치환되는 As이 InGaAs의 표면에 있는 As 층인지 아니면 잘 알려진 As의 메모리 효과에 의해 뒤이어 성장되는 InP 층에 포함되는 As 인지는 명확하지 않다. 양자우물층의 두께가 얇아짐에 따라 계산에 의한 에너지 변이값과 PL 측정으

로부터 얻어진 에너지 변이값 사이의 차이가 커지고 이러한 효과는 InP 층내에 포함되는 As의 메모리 효과에 의한 것으로 알려져 있다[13, 16]. As의 메모리 효과를 억제하기 위해 InGaAs 성장후, PH₃ 또는 H₂ 분위기에서 성장정지 시간을 주는 방법이 사용되며, 이때 PH₃이 보다 효과적인 것으로 알려져 있다[13]. Fig. 9의 결과도 10초 동안의 H₂ 분위기에서의 성장정지는 피크 에너지에 변화를 주지 못했음을 보여준다.

그러나 t₄ 정지시간이 길어짐에 따라 Fig. 9에서와 보이는 피크의 반가폭은 0초의 경우 8 meV에서 20초의 경우 15 meV까지 지속적인 증가를 보였으며 이는 계면이 불균일해지기 때문으로 생각된다. t₄ 정지시간이 InP 내에 포함되는 As의 메모리 효과를 억제한다면 계면특성은 향상될 것이고 반가폭의 증가도 없을 것으로 예상된다. 반가폭의 증가는 t₄ 정지시간 동안 InGaAs 표면에 존재하는 일정량의 As이 P에 의해 치환되어 계면에서의 조성이 불균일해지기 때문으로 생각된다. t₂ 시간 동안 As이 대부분의 P를 치환하는 경우와는 달리 이 경우에는 그 치환반응이 일부분에 걸쳐서만 일어나기 때문에 반가폭의 증가를 가져오는 것으로 생각된다. 따라서 알려진 바와 같이 t₄ 시간 동안의 PH₃ 분위기에서의 성장정지에 의해 As의 메모리 효과를 억제함으로써 양자 효과에 의한 에너지 변이가 커지는 효과가 주되게 나타나더라도 InGaAs 표면의 As이 P로 치환됨에 따른 계면의 불균일성도 PL 특성에 기여하는 것으로 보여진다.

4. 결 론

다양한 성장 정지시간에 따른 InGaAs/InP 양자우물구조의 PL 스펙트럼의 변화를 관찰하였고, 이를 통해 계면구조의 변화를 분석하였다. t₁과 t₂ 성장 정지 시간동안 표면에 흡착되는 불순물에 의한 것으로 생각되는 반가폭의 증가를 발견하였다. 성장 정지 시간 동안의 어닐링 효과는 나타나지 않았으며 이는 성장속도가 느린 MOCVD 성장이므로 2차원 성장모드로 성장이 이루어지기 때문으로 생각된다. t₂ 성장 정지 시간 동안 AsH₃을 공급한 결과, As-P 교환에 의해 양자우물층의 유효두께가 증가하여 PL 피크가 저에너지 쪽으로 이동하였다. As-P 교환반응은 계면 양자우물구조 성장실험을 통해, 1-2 ML의 유효 두께를 가지는 InAs 층을 형성하고 치환반응은 1초 이내에 빠르게 일어나며, 더 이상의 치환반응은 표면의 InAs 층에 의해 억제되어 이후 시간 동안

에는 우물층 두께증가가 크지 않은 것으로 확인되었다. 또한 PL 반가폭은 크게 변화하지 않았고, 이는 As-P 교환반응이 표면 전체에 걸쳐 고르게 빨리 일어나기 때문으로 생각된다. t₄ 성장 정지 시간동안 PH₃과 H₂를 각각 공급하여, PL 피크가 고에너지쪽으로 이동하고 반가폭이 증가하는 결과를 얻었다. 이는 메모리 효과에 의해 InP 층으로의 As 침투가 억제되고, InGaAs 표면의 As 일부가 P로 교환되었기 때문으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 반도체공동연구소의 교육부 반도체분야 학술연구 조성비(과제번호: ISRC 94-E-3142와 ISRC 95-E-3206)와 한국과학재단 특정연구과제(과제번호: KOSEF 93-01-00-17)의 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

1. M. E. Heimbuch, A. L. Holmes, JR., C. M. Reaves, M. P. Mack, S. P. Denbaars, and L. A. Coldren, J. Electron. Mater. **23**, 87 (1994).
2. A. McKee, C. J. McLean, A. C. Bryce, R. M. De La Rue, and J. H. Marsh, and C. Button, Appl. Phys. Lett. **65**, 2263 (1994).
3. M. E. Sherwin, D. T. Nichols, G. O. Munns, P. K. Bhattacharya, and G.I. Haddad, J. Electron. Mater. **20**, 979 (1991).
4. J. Braithwaite, M. Silver, V. A. Wilkinson, E. P. O'Reilly, and A. R. Adams, Appl. Phys. Lett. **67**, 3546 (1995).
5. G. Zhang, and A. Ovtchinnikov, J. Appl. Phys. **73**, 3599 (1993).
6. O. Issanchou, J. Barrau, E. Idiart-Alhor, and M. Quillec, J. Appl. Phys. **78**, 3925 (1995).
7. W. Z. Shen, S. C. Shen, Y. Chang, W. G. Tang, Y. Lu, and A.Z. Li, Appl. Phys. Lett. **68**, 78 (1996).
8. E. Evoy, G. F. Redinbo, and H. G. Craighead, Appl. Phys. Lett. **68**, 1259 (1996).
9. L. Goldstein, M. N. Charasse, A. M. Jean-Louis, G. Leroux, M. Allovon, and J. Y. Marzin, J. Vac. Sci. Technol. B **3** 947 (1985).
10. S. D. Perrin, C. P. Seltzer, and P. C. Spurdens, J. Electron. Mater. **23**, 81 (1994).
11. W. Seifert, J.-O. Fornell, L. Ledebro, M.-E. Pistol, and L. Samuelson, Appl. Phys. Lett. **56**, 1128 (1990).
12. R. F. Kopf, E. F. Schubert, T. D. Harris, and R. S.

- Becker, Appl. Phys. Lett. **58**, 631 (1991).
13. K. Streubel, V. Harle, F. Scholz, M. Bode, M. Grundmann, J. Appl. Phys. **71**, 3300 (1992).
 14. V. R. McCrary, J. W. Lee, S. N. G. Chu, S. E. G. Slusky, M.A. Brelvi, G. Livescu, P. M. Thomas, L.J. P. Ketlesen, and J. L. Zilko, J. Appl. Phys. **69**, 7267 (1991).
 15. T. Y. Wang, K. L. Fry, A. Persson, E. H. Reihlen, and G. B. Stringfellow, J. Appl. Phys. **63**, 2674 (1988).
 16. J. Camessel, J. P. Laurenti, S. Juilaguet, F. Reinhardt, K. Wolter, H. Kurz, and D. Grutzmacher, J. Cryst. Growth **107**, 543 (1991).
 17. D. Bimberg, D. Mars, J. N. Miller, R. Bauer, and D. Oertel, J. Vac. Sci. Technol. B **4**, 1014 (1986).
 18. Y. Moon, H.-S. Park, E. Yoon, J. Korean. Vac. Soc. **4**, 394 (1995).
 19. H.-S. Park, Y. Moon, E. Yoon, J. Korean. Vac. Soc. **5**, 206 (1996).
 20. A. K. Ghatak, K. Thyagarajan, and M. R. Shenoy, IEEE J. Quantum Electron. **24**, 1524 (1988).
 21. B. Jonsson and S. T. Eng, IEEE J. Quantum Electron. **26**, 2025 (1990).
 22. E. F. Schubert, in *Doping in III-V Semiconductors* (Cambridge University Press, New York, 1993), p. 543.
 23. D. Grutzmacher, J. Hergeth, F. Reinhardt, K. Wolter, and P. Balk, J. Electron. Mater. **19**, 471 (1990).
 24. Z. Sobiesierski, S. A. Clark, R. H. Williams, A. Tabata, T. Benyattou, and G. Guillot, Appl. Phys. Lett. **58**, 1863 (1991).
 25. W. P. Gillin, S. S. Rao, I. V. Bradley, K. P. Home-wood, A. D. Smith, and A. T. R. Briggs, Appl. Phys. Lett. **63**, 797 (1993).