

MBE로 성장된 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$ 양자점 적외선 수광소자의 수소화 처리가 광학적 특성에 미치는 특이영향

임주영^{1,2} · 송진동¹ · 최원준^{1*} · 조운조¹ · 이정일¹ · 양해석²

¹한국과학기술연구원 나노소자 연구센터, 서울 136-791

²중앙대학교 자연과학대학 물리학과, 서울 156-756

(2006년 2월 20일 받음)

분자선 에피택시 (MBE)법으로 성장된 양자점 적외선 수광소자(Quantum Dot Infrared Photodetector: QDIP)구조의 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$ 자발형성 양자점에 대하여, 수소화 처리(Hydrogen Plasma treatment) 전후의 각각의 특성을 광학적인 방법으로 분석하였다. 광학적 특성은 광루미네선스(photoluminescence: PL) 그리고 광전류(Photocurrent: PC)방법으로 각각 15K ~ 300K, 10K ~ 130K 범위에서 측정되었으며, 수소화 처리 전후의 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 자발형성 양자점의 광학적 특성을 비교 분석해보면, 원시료(as-grown)의 하나의 봉우리가 수소화 처리를 통하여 두개의 봉우리로 나뉘지만 PL의 전체 세기(intensity)에는 큰 변화가 없었으며, 광전류는 수소화 처리 후에 감소함을 알 수 있다. 수소화 처리 전후의 샘플에 대해 PL의 결과로부터 활성화 에너지를 계산하여 비교해보면, 수소화 처리 전후의 활성화 에너지가 다름을 알 수 있고, 이 변화된 활성화 에너지 값은 측정된 광전류의 봉우리에 해당하는 에너지 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 수소화 처리된 샘플은 역 수소화 처리를 통하여 PL 그래프의 모양이 원시료의 모양으로 되돌아가야 함에도 불구하고, 수소화 처리된 시료의 PL의 그래프와 동일한 모습을 보였다. 이러한 현상은 자발형성 양자점의 수소화 처리에 따른 양자점 내부의 양자점 조성의 변동에 그 원인이 있는 것으로 보인다.

주제어 : 양자점, 양자점 적외선 수광소자, 수소화 처리, 광루미네선스

I. 서 론

저 차원의 반도체 양자구조는 차세대 광전소자로의 응용 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있다[1]. 0차원인 양자점을 이용하면 저전력, 초고속 및 우수한 광학적 특성 등을 얻을 수 있고 집적도를 높이고 전력 소모를 줄일 수 있기 때문에 양자점 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자발형성 $\text{In}(\text{Ga})\text{As}$ 양자점의 경우 광전소자에 적용시킬 때, 양자점은 큰 면적밀도, 깊은 potential 그리고 높은 양자효율을 가지고 있어 소자가 높은 온도에서도 동작을 할 수 있게 된다[2,3]. 그렇기 때문에 최근 들어 이러한 양자점들이 소자에 응용되는 사례가 많고, 그 중 양자점 적외선 검출기 (Quantum Dot Infrared Photodetector: QDIP)는 중간대역 적외선 영상을 이용한 감시, 전기적 기계적 결함 발견을 위한 온도측

정, 화학적 공정을 관찰하는데 사용되는 등 광범위하게 사용되어 주의를 끌고 있다[4,5]. 양자점 적외선 검출기(QDIP)는 양자우물 적외선 검출기(QWIP)에 비하여 두가지 중요한 장점이 있는데 첫째, 양자점에 의한 0차원적 양자구속 효과는 방향성에 관계가 없으므로 편광선택 법칙에 영향을 받지 않고 동작을 한다는 점과 둘째, 양자점은 양자 우물 구조에 비해 고온 동작에 유리하다는 점이다. 이러한 양자점 구조에서의 3차원적인 구속효과는 양자우물 구조의 부밴드 간 천이에서보다 여기가 더욱 쉽게 일어날수 있는 가능성이 크다[6]. 그러나 양자점 구조는 낮은 온도에서 성장이 이루어지기 때문에 높은 strain 구조를 갖게 되어 많은 결함(defect)또는 비발광중심(nonradiative center)들을 가지게 된다. 그렇기 때문에 이러한 QDIP 소자의 성능을 개선시키기 위하여 급속 열처리(rapid thermal annealing: RTA)나 수소

* [전자우편] wjchoi@kist.re.kr

화 처리(Hydrogen Plasma treatment)같은 후처리 공정을 필요로 하게 된다. 급속 열처리하는 소자의 전기적 특성에 영향을 미치게 되어 PL특성에서 선풍이 좁아지고 세기(intensity)가 늘어나는 효과를 가져오고, 수소화 처리를 하면 dot의 밀도와 크기에 영향을 주어 PL 세기가 늘어나는 등 반도체의 전기적 광학적 특성에도 영향을 미치게 된다[7-10].

양자 구속효과에 의하여 양자점 소자는 어느 정도의 고온 동작이 가능하지만, 후처리 공정을 활용한다면 더욱 쉽게 상온 동작을 하는 소자를 제작할 수 있는 가능성이 있으리라 생각된다. 본 연구에서는 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy: MBE) 방법으로 성장한 InGaAs 자발형성 양자점 구조와 동일한 구조의 InGaAs 자발형성 양자점을 수소화 처리하여 분광법의 한 종류인 광루미네선스(photoluminescence: PL) 방법과 광전류(Photocurrent: PC) 측정을 통하여 수소화 처리된 양자점 구조의 광학적 특성을 비교 분석하였다.

II. 실험 방법

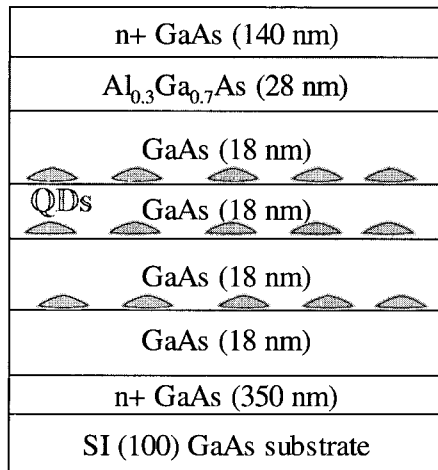


그림 1. QDIP 구조

본 연구에 사용된 자발형성 양자점 시료는 MBE방법으로 성장되었다. 반절연성 GaAs(100) 기판 위에 350 nm 두께의 n+GaAs 층을 성장 후, 18 nm 두께의 GaAs 장벽층을 갖는 In_{0.5}Ga_{0.5}As 양자점을 3층 교대로 성장하고 28nm 두께의 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 층을 형성한 후, 150 nm 두께의 n+GaAs 층을 차례로 성장

하였다. 자세한 시료의 구조는 그림 1에 나타내었다. 동일한 조건에서 성장한 양자점에 대해 원자력간현미경(AFM: atomic force microscopy)을 사용하여 자발형성 양자점의 표면형상을 관찰하였으며 AFM 이미지는 그림 2에 나타내었다.

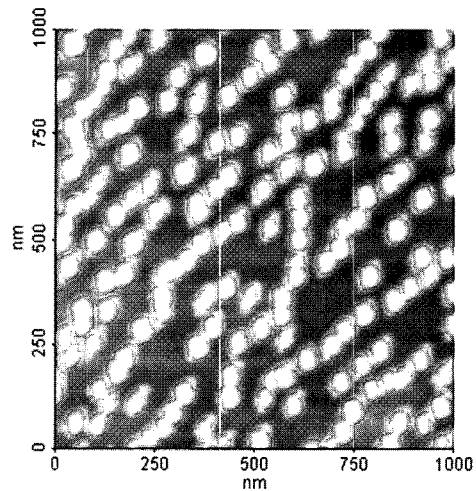


그림 2. ALE방식으로 성장된 InGaAs 양자점의 1.0 x 1.0 μm² AFM 영상

QDIP소자의 형성과, 광전류 측정을 위하여 ~1x1cm² 크기의 시료를 사진식판인쇄, 습식화학식각 그리고 급속전극부착 과정을 거쳐 단일 메사 구조로 형성시켰다.

제작된 원적외선 수광소자의 수소화 처리는 기판 온도 200°C 에서 H₂ 플라즈마에 15분간 노출시켰으며 수소의 압력은 240 mTorr 이고, RF 파워 밀도는 60 mW/cm² 였다. 시료의 특성을 조사하기 위하여 수소화 처리 전후의 샘플 모두를 PL, 그리고 광전류 방법으로 측정, 분석 하였다. PL의 측정 조건은 여기 광원으로 He-Ne(632.8nm) 레이저를 사용하였고, 저온장치를 사용하여 저온으로 내린 후 15K ~ 300K 까지 등간격으로 측정하였다. 이때 여기된 빛은 액체 질소를 사용하여 온도를 낮춘 InGaAs 검출기를 사용하여 측정하였다. 광전류는 저잡음 전류증폭기와 푸리에 변환분광기(FT)를 사용하여 단일 경로의 입사각을 갖는 구조에서 측정되었으며, 샘플들은 ZnSe로 창을 형성한, 온도조절이 가능한 저온장치 내부에 장착되었고, 편광되지 않은 빛을 사용하여 여기(excitation) 하였다. 이때 반사된 빛은 10K ~ 130K 에서 calibrated pyroelectric detector를 사용하여 측정하였다.

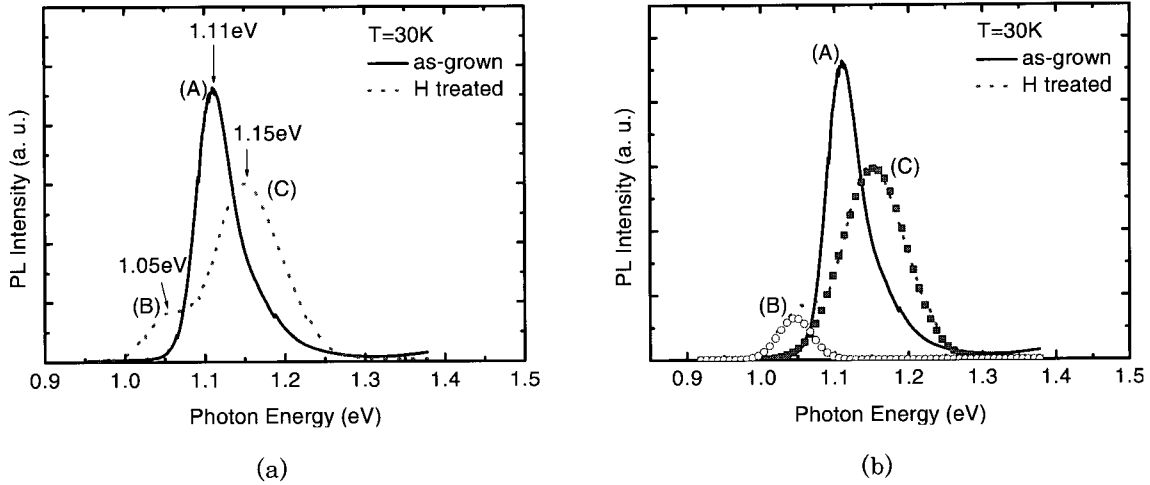


그림 3. (a) 30k에서의 PL 특성 비교와, (b) 각 그래프를 성분별로 분해한 그래프

III. 실험결과 및 논의

그림 1 은 본 연구에서 사용된 시료의 구조를 나타내고 있다. 수소화 처리된 샘플의 구조 역시 동일하다. 본 연구에서는 원자층 에피택시(Atomic Layer Epitaxy: ALE)방법으로 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 양자점을 3 mono-layer(ML) 성장시키고 InGaAs 양자점 층의 아래위에 18 nm 두께의 GaAs 장벽층(blocking layer)을 형성시켰다. 그리고 28 nm 두께의 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 장벽층을 상면전극층(top contact layer) 아래에 형성시켰다. $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 장벽층은 광기전력효과(photovoltaic effect)를 나타내게 하는 역할을 하는데, 이는 광전류 측정시 0-bias 하에서도 광전류가 측정되는 것으로서 설명될 수 있다[11]. ALE 방법으로 성장된 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 양자점과 GaAs spacer는 140 nm 두께의 n+GaAs 상면 전극층과 350 nm 두께의 n+GaAs 하면 전극층(bottom contact layer) 사이에 위치한다. 상하의 n+GaAs 층은 양자점 구조를 QDIP 소자로 형성할 때 전극층(contact layer)의 역할을 하도록 설계된 부분이다. 전극층은 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 Si로 doping되어 있다. 각각의 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 양자점 층들은 1 mono-layer(ML)-thick 를 갖는 InAs와 1ML-thick 를 갖는 GaAs 층들이 기판 온도 510 °C에서 5번의 주기를 가지며 반복적으로 형성되었다.

그림 2 는 시료의 AFM 이미지를 보여준다. 이 사진은 GaAs 기판위에 자발형성 InGaAs 양자점을 형성한 후 측정된 결과이다. 양자점을 형성한 후 GaAs 덮개층을 형성하지 않은 상태에서 AFM으로 관찰 하였다. 양자점의 평균 밀도는 $\sim 2.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 이고 양자점

의 평균 높이는 $\sim 7 \text{ nm}$, 평균 크기는 $\sim 45 \text{ nm}$ 로 3개 층의 layer를 갖는다. 양자점에는 Si가 $\sim 2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 정도 도핑이 되어 있다. 일반적인 InAs와 GaAs의 성장률은 각각 0.07 ML/s 와 1 ML/s 이다.

그림 3 의 (a)는 30K 에서의 수소화 처리 전후 샘플의 PL 특성을 보여준다. PL 측정은 저온인 15K부터 상온인 300K까지 온도 별로 측정하였다. 그림 3 의 (a)그림은 30K 에서 측정된 그래프만을 분리하여 나타낸 것이다. 처리 전 샘플의 PL 곡선은 실선으로, 수소화 처리된 샘플은 점선으로 나타내었다. PL 측정 결과를 살펴보면 처리 전 샘플은 기저상태에서 1.11 eV의 에너지를 가지는데 반해 수소화 처리된 샘플은 기저상태에서 1.05 eV와 1.14 eV의 두개의 에너지 상태를 보였으며, 수소화 처리 전후의 PL 픽의 전체 세기는 큰 변화가 없었다. 다른 대부분의 실험과 논문에서는 수소화 처리를 하면 결함(defect) 또는 비발광중심(nonradiative center)이 줄어들어 PL의 세기가 증가 하였다고 보고 되었지만[12], 본 실험에서는 전체 PL의 세기는 거의 변화가 없고, 픽의 모양이 최초 하나에서 수소화 처리 후 두개로 나뉘어지는 독특한 결과가 관찰되었다. 이는 수소화 처리를 통하여 샘플 내부의 결함 또는 비발광중심이 줄어드는 것 외에 다른 요인이 작용한 것으로 볼 수 있다.

여기 광원으로 파장이 514.5 nm 인 Ar^+ -ion 레이저를 사용하여 동일한 조건에서 PL 을 측정한 결과 역시 PL 세기의 차이만 보일뿐 두개의 에너지 상태를 보이는 것은 동일하였으므로 레이저 광원에 의한 효과는 아니며, 레이저의 파워를 변화시키면서 측정된 PL 결과에서 두개의 봉우리가 거의 동일하게 세기가

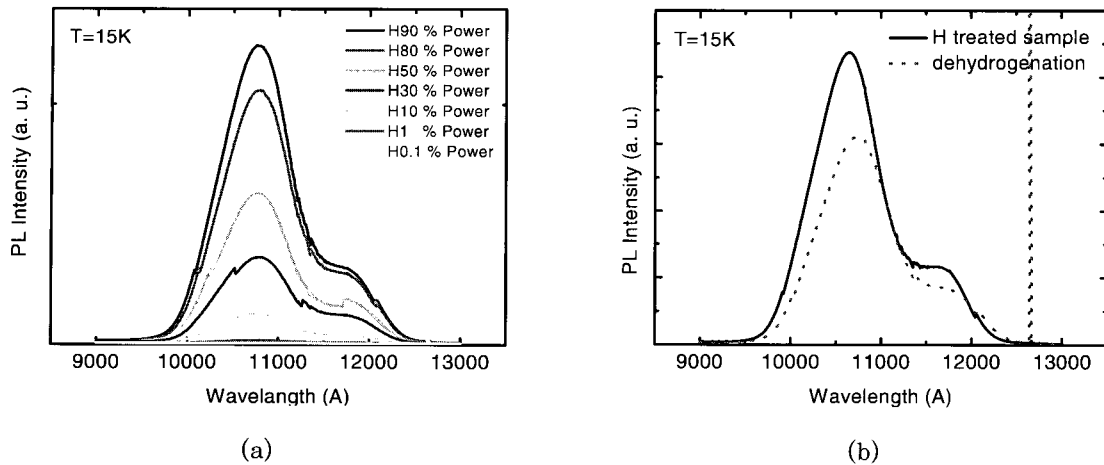


그림 5. (a) 수소화 처리한 샘플의 파워를 변화시키며 측정된 PL. (b) 역 수소화처리를 통한 변화.

감소하는 것으로 보아 양자점의 크기가 변화한 것으로 생각 될 수 있다(그림 5의 (a)). 만약 수소화 처리 과정 동안 양자점의 크기와 밀도가 변화하지 않았다고 가정하면, 역 수소화 처리를 통하여 PL 봉우리가 처리 전 샘플의 PL 봉우리보다 돌아가야 함에도 불구하고 300K에서 30분간의 역 수소화 처리를 거친 후 측정된 PL의 그래프(그림 5의 (b)) 역시 두개의 모습으로 나오는 것으로 보아 수소화 처리된 샘플 내부의 양자점 조성이 변동된 것으로 설명 될 수 있다.

이전의 대부분의 연구결과에서는 수소화 처리를 하게 되면 PL의 세기는 개선되지만 PL의 봉우리 위치는 변화하지 않는 것으로 보고되었으나[12], 몇몇 연구의 결과로서 보고된 것을 살펴보면, 다양한 조건에서의 수소화 처리를 통하여 GaN 양자점의 밀도와 크기가 변화했다는 결과가 있다[13]. 그러므로 본 연구에서 보이는, 수소화 처리된 샘플의 PL 그래프의 변화도 이러한 양자점의 밀도와 크기가 변화한 것으

로 이해할 수 있다. 그림 3의 (b)는 30K에서의 수소화 처리 샘플의 PL 그래프 모양을 가우시안(Gaussian) 곡선으로 분해하여 원시료와 비교한 것이다. 실선이 처리전 샘플이며 점선이 수소화 처리한 샘플이고, 점선 위의 원점과 네모점으로 표현된 부분이 수소화 처리한 샘플의 성분을 가우시안 분해한 것이다. (b)에서 속이 빈 원점으로 나타난 부분이 그룹 1 이고 속이 찬 네모점으로 나타난 부분이 그룹 2로 가정하였다.

그림 4는 광전류를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그림 4의 (a)는 10K에서 0 바이어스의 전압을 인가하였을 때, 처리 전 QDIP 샘플과 수소화 처리된 QDIP 샘플의 광응답 스펙트럼(photo response spectra)을 보여준다. 0 바이어스 전압에서의 처리 전 QDIP 샘플이 보여주는 광대역의 광전류 스펙트럼(실선으로 표시)은 광자 에너지 범위가 100 - 400 meV(파장범위로는 3.1 - 12 μm)에서 관찰된다. 이러한 광전류는

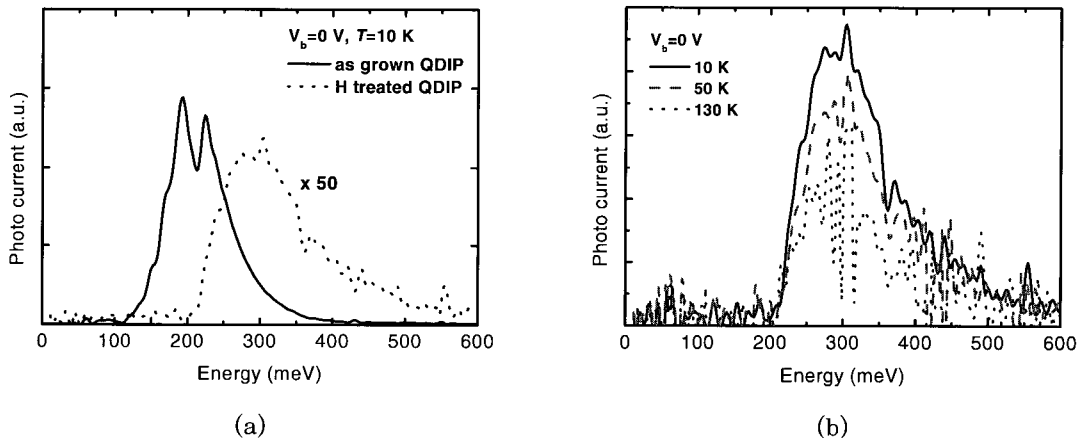


그림 4. (a) 0-bias 전압, 10k에서 측정된 처리전 QDIP와 수소화 처리된 QDIP의 광전류 스펙트럼. (b) 0-bias 전압, 10k-130k에서 측정된 수소화 처리된 QDIP의 광전류 스펙트럼.

경계 준위와 연속 준위 사이의 부준위간 천이에 의한 결과로 생각 된다. 광응답 봉우리의 위치는 $6.42 \mu\text{m}$ (193 meV) 에서 나타나는데, 인가되는 bias 전압을 달리해도 봉우리의 위치에는 변화가 없었다. 온도를 50K 로 높이고 측정해보면, 검출기의 배경 신호를 고려할 때, 처리 전 QDIP 샘플의 광응답 스펙트럼이 $5.79 \mu\text{m}$ (214 meV)에서 갑자기 감소하는 모습이 관측되는데, 이는 FT 분광기로 측정하는 동안 사용된 개스에 의한 흡수 때문에 나타난 효과라 생각된다.

수소화 처리된 QDIP 샘플의 경우를 살펴보면, 0-bias 전압에서 광자 에너지 범위는 200 - 550 meV(파장범위로는 $2.3 - 6.2 \mu\text{m}$)로 나타나고 광대역의 광전류 스펙트럼(점선으로 표시)으로 나타난다(그림 4의 (a)에서 점선으로 나타난 부분에 해당한다.). 이 경우의 광응답 봉우리의 위치는 $4.01 \mu\text{m}$ (302 meV)에서 나타나는데, 인가되는 바이어스 전압을 달리해도 봉우리의 위치에는 변화가 없었다. 그림 4의 (b)에서처럼 130K에서 측정된 광전류는 처리 전 QDIP 샘플과 수소화 처리된 QDIP 샘플에 대응되는 반응도(responsivity)는 각각 21.0 mA/W와 0.28 mA/W를 나타내었다. 이러한 반응도의 차이는 수소화 처리 후 양자점의 크기가 두 종류로 변화함에 따라, 광전류 측정시 기여하는 양자점의 수가 달라져 나타난 결과로 이해된다.

온도에 따른 광전류의 변화를 살펴보면 처리 전 샘플은 온도의 증가에 따라 급격하게 감소하는 모습을 보이지만, 수소화 처리한 샘플의 경우는 온도가 변화하여도 처리 전에 비하여 큰 변화를 보이지 않았으며, 측정된 온도 역시 처리 전은 50K, 수소화 처리한 샘플은 130K까지 이다. 광전류의 측정 결과와 온도의존성 PL 측정을 통한 활성화 에너지의 추출 결과를 비교해 보면, 수소화 처리 후에 크기가 큰 양자점이 다량의 전자들이 구속되어 큰 활성화 에너지를 갖게 되어 온도 변화에 따른 영향을 작게 받아 고온 동작을 할 수 있고, 소자의 특성이 향상되었다.

그림 6 은 온도의존성 PL 측정결과로부터 계산한 활성화 에너지를 나타낸 것이다. 이러한 활성화 에너지는 양자우물이나 양자점의 온도를 변화시키며 측정된 PL로부터 각각의 면적을 적분한 값으로 얻을 수 있는데, 양자우물이나 양자점의 구속된 상태와 관계가 있다[14-16]. 양자점의 전도띠 내부 전자들의 독립적인 텃들을 양자점의 각각의 준위에서 고려해보면, 텃에 걸리지 않을 확률을 $\exp(-\Delta E/k_B T)$ 로 표현할 수 있

다. 이때 활성화 에너지, $\Delta E = E_{\text{barrier}} - E_{\text{trap}}$, k_B 는 볼츠만 상수, T 는 측정된 온도이다[15]. 활성화 에너지의 계산은 여러 가지 식을 사용할 수 있는데, 그 중 conduction band내부의 두 활성화 에너지 사이의 열이온의 공정을 고려하면 (1)식처럼 쓸 수 있다[16].

$$I = I_0 / \{1 + C_1 \exp(-E_{a1}/kT) + C_2 \exp(-E_{a2}/kT)\} \quad (1)$$

여기서, I , E_{a1} , E_{a2} , k 와 T 는 각각 PL 측정치를 적분한 값과, 경계준위 사이의 활성화 에너지, 볼츠만 상수($8.62 \times 10^{-2} \text{ meV/K}$)와 측정온도(K)이다. 또한 I_0 , C_1 와 C_2 는 여기율과 맞춤상수를 각각 나타낸다. (1) 식을 사용하여 맞춘 결과가 그림 6에 그래프로 나타나 있다.

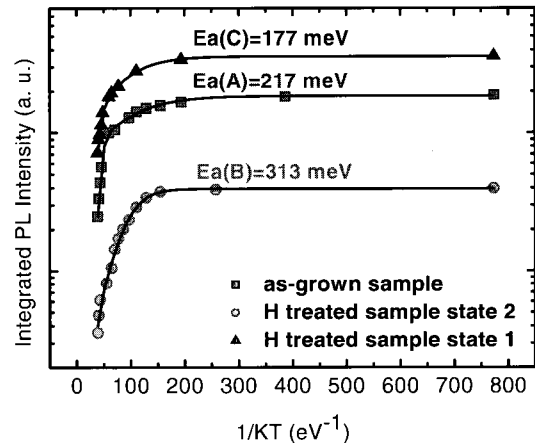


그림 6. 온도 의존성으로부터 계산한 활성화 에너지

그림 6 에서 보는 바와 같이, 처리 전 샘플의 활성화 에너지 E_{a1} 는 $217 \pm 36 \text{ meV}$ ($5.71 \mu\text{m}$)로 계산되었다. 또한 수소화 처리를 한 샘플의 경우 그룹 1의 활성화 에너지는 $313 \pm 196 \text{ meV}$ ($3.96 \mu\text{m}$)이며, 그룹 2의 활성화 에너지는 $177 \pm 15 \text{ meV}$ ($7.00 \mu\text{m}$)임을 알 수 있다. 이에 대응하여 측정된 광전류 스펙트럼의 처리 전 샘플의 경우 $6.2 \mu\text{m}$ ($=200 \text{ meV}$), 수소화 처리를 한 샘플의 그룹 1의 경우 $4.10 \mu\text{m}$ ($=302 \text{ meV}$)로 나타났으며, 이러한 결과는 온도의존성 PL의 결과로부터 추출한 활성화 에너지의 값과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만 그룹 2의 광전류는 측정이 되지 않았는데 이는 열적인 공정에 의해 전자가 방출되어 측정시 검출이 이루어지지 않은 것으로 해석된다.

그림 7 은 그림 6 으로부터 계산된 활성화 에너지를 그림으로 나타낸 것이다. 이 그림은 위 식으로부터 계산되고 그래프로 나타내어진 활성화 에너지의

변화가 실제로 샘플의 에너지 밴드의 구성을 어떻게 변화시키는지 보여주고 있다. 최초 처리전의 에너지 밴드는 하나로 217 meV의 활성화 에너지를 갖고, 수소화 처리를 하게 되면 에너지 밴드가 두개로 나뉘며 원래의 처리 전 샘플의 에너지 밴드보다 각각 위아래로 이동하게 되어 313 meV와 177 meV의 활성화 에너지를 갖게 되는 결과를 보이게 된다.

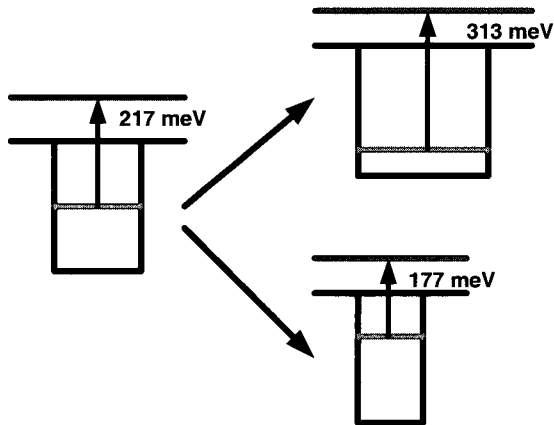


그림 7. 그림 6 으로부터 계산된 활성화 에너지를 그림으로 나타낸 것.

이러한 PC와 온도 의존성 PL 그리고 역 수소화 처리의 결과 등으로 미루어 볼 때, 수소화 처리에 따른 InGaAs 양자점 내부에서 양자점 조성의 변동 (compositional fluctuation)이 발생하여 양자점의 크기 혹은 분포가 변화한 것으로 이해된다. 비록 수소화 공정이 양자점의 크기, 조성 및 분포에 영향을 미친다는 여러 보고가[17,18] 있지만 이러한 변화를 유발하는 물리적 기전에 대한 심도 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

MBE 방법에 의해 성장된 InGaAs 양자점 원적외선 수광소자 구조의 수소화 처리가 PL 발광 파장 및 원적외선 광전류 스펙트럼의 특성에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었다. 본 실험에서 사용된 InGaAs 양자점 원적외선 수광소자 구조의 수소화 처리 전 샘플은 단일 봉우리를 갖는 PL 스펙트럼을 나타내는데 비해, 수소화 처리를 한 경우 그 에너지가 원시료의 PL 봉우리 에너지보다 큰 것과 작은 것 두개의 봉우리를 갖는 PL 스펙트럼을 보였으며 역수소

화 처리를 통해서도 동일한 PL 스펙트럼을 유지하였다. 수소화 처리 후 생성된 PL 스펙트럼의 두 봉우리는 가우시안 곡선을 통한 fitting 결과 두개의 다른 크기를 갖는 양자점으로 구성된 것으로 판단되었다. 이러한 결과는, 비록 그 기전이 명확하지는 않지만, 수소화 처리가 양자점 크기 분포에 영향을 주는 것으로 이해된다. 각 샘플의 PL 봉우리들에 대한 온도의존성 측정결과로부터 양자점에 구속된 전자의 활성화 에너지를 계산한 결과 원 샘플의 경우, 217 meV, 수소화 처리한 샘플의 경우, 낮은 PL 봉우리의 경우 313 meV, 높은 PL 봉우리의 경우 177 meV의 값을 보였다. 원적외선 광전류 스펙트럼의 측정결과 원시료의 경우 6.42 μm (193 meV)에서 봉우리를 형성했으며, 수소화 처리된 샘플의 경우 높은 에너지의 PL 스펙트럼 봉우리에 기인하는 광전류 봉우리는 낮은 구속에너지에 기인한 열전류 방출에 의해 관측되지 않았으며, 낮은 에너지의 PL 봉우리에 해당하는 광전류 봉우리가 4.01 μm (302 meV)에서 관측되었다. 이러한 광전류 스펙트럼의 측정결과는 온도의존성 PL 측정결과로부터 추출한 활성화 에너지의 값과 매우 잘 일치하였다. 따라서 소자를 제작하여 원적외선 광전류 스펙트럼을 측정하지 않고 온도의존성 PL 측정을 통한 활성화 에너지의 추출을 통해 양자점 원적외선 수광소자의 원적외선 측정과정을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원의 나노과학기술 국가 R&D 프로젝트, 과학기술부 지원의 한중 광기술 연구협력센터 및 국가지정연구실사업과 KIST 기관고유사업의 지원을 통하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] C. Weisbuch and B. Vinter, *Quantum Semiconductor Structures* (Academic, New York, 1991).
- [2] K. Mukai, Y. Nakata, K. Otsubo, M. Sugawara, N. Yokoyama, and H. Ishikawa, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3349 (2000).
- [3] R. L. Sellin, Ch. Ribbat, M. Grundmann, N.

- N. Ledentsov, and D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 1207 (2001).
- [4] D. Pan, E. Towe, and S. Kennerly, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 1937 (1998).
- [5] S. Maimon, E. Finkman, G. Bahir, S. E. Schacham, J. M. Garcia, and P. M. Petroff, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2003 (1998).
- [6] Bhattacharya, S. Krishna, J. Phillips, P. J. McCann, and K. Namjou, *J. Cryst. Growth.* **227-228**, 27 (2001).
- [7] S. Higai and T. Ohno, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 3839 (2001).
- [8] J. M. Javada, R. G. Wilson, C. R. Abernathy, and S. J. Pearton, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 2724 (1994).
- [9] Sh. U. Yuldashev, I. L. Bolotion, Y. B. Hou, J. H. Leem, H. C. Jeon, T. W. Kang, and T. W. Kim, *J. Appl. Phys.* **86**, 859 (1999).
- [10] A. Herro, S. A. Ringel, M. Hansem, J. S. Speck, U. K. Mishra, and S. P. DenBaars, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 1499 (2000).
- [11] S. -F. Tang, S. -Y. Lin, and S. -C Lee, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2428 (2001).
- [12] A. P. Jacob, Q. X. Zhao, M. Willander, F. Ferdos, M. Sadeghi, and S. M. Wang, *J. Appl. Phys.* **92**, 6794 (2002).
- [13] G. N. Panin, T. W. Kang, T. W. Kim, S. H. Park, S. M. Si, Y. S. Ryu, and H. C. Jeon, *Physica. E.* **17**, 484 (2003).
- [14] J. D. Lambkin, D. J. Dunstan, K. P. Homewood, L. K. Howard, and M. T. Emery, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1986 (1990).
- [15] M. Vening, D. J. Dunstan, and K. P. Homewood, *Phys. Rev. B* **48** 2412 (1993).
- [16] S. -K. Park, Y. J. Park, E. K. Kim, C. J. Park, H. Y. Cho, Y. S. Lim, J. Y. Lee, and C. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 4378 (2002).
- [17] S. Nahm, H. J. Lee, and H. Ryu, *J. Crystal Growth.* **182**, 292 (1997).
- [18] B. Lita and R. S. Goldman, J. D. Phillips, and P. K. Bhattacharya, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 2797 (1999).

Anomalous Effect of Hydrogenation on the Optical Characterization In_{0.5}Ga_{0.5}As Quantum Dot Infrared Photodetectors

J. Y. Lim^{1,2}, J. D. Song¹, W. J. Choi^{1*}, W. J. Cho¹, J. I. Lee¹, and H. S. Yang²

¹*Nano Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology*

P.O.Box 131 Cheongryang, Seoul 130-650

²*Dept. of Physics, Chung Ang University, Seoul 156-756*

(Received February 20, 2006)

We have investigated the characteristics of hydrogen (H) plasma treated quantum dot infrared photodetectors (QDIPs). The structure used in this study consists of 3 stacked, self assembled In_{0.5}Ga_{0.5}As/GaAs QD layer separated by GaAs barrier layers that were grown by molecular beam epitaxy. Optical characteristics of QDIPs, such as photoluminescence (PL) spectra and photocurrent spectra, have been studied and compared with each other for the as grown and H plasma treated QDIPs. H plasma treatment, resulted in the splitting of PL peak, which can be attributed to the redistribution of the size of QDs. The activation energies estimated from the temperature dependence of integrated PL intensity for as grown and H plasma treated QDIPs are found to be in good agreement with those determined from corresponding peaks of photocurrent spectra. It is also noted that photocurrent is detected up to 130 K for the H plasma treated QDIP, suggesting the future possibility for the development of infrared photodetectors with high temperature operation.

Keywords : Quantum dot, Quantum dot infrared photodetector, Hydrogen plasma treatment, Photoluminescence

* [E-mail] wjchoi@kist.re.kr