

# 유기금속화학기상증착법을 이용한 적층 InAs 양자점 적외선 수광소자 성장 및 특성 평가 연구

김정섭<sup>a</sup> · 하승규<sup>b</sup> · 양창재<sup>a</sup> · 이재열<sup>a</sup> · 박세훈<sup>a</sup> · 최원준<sup>b</sup> · 윤의준<sup>a,c,d,\*</sup>

<sup>a</sup>서울대학교 재료공학부, 서울 151-744

<sup>b</sup>한국과학기술연구원 나노융합소자센터, 서울 136-791

<sup>c</sup>서울대학교 재료공학부 WCU하이브리드 재료전공, 서울 151-744

<sup>d</sup>서울대학교 융합기술과학대학원 나노융합학과, 수원 443-270

(2010년 2월 16일 받음, 2010년 3월 16일 수정, 2010년 3월 17일 확정)

유기금속화학기상증착법으로 적층 InAs/In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As DWELL (dot-in-a-well) 구조를 성장하여 n-i-n 구조의 적외선 수광소자를 제작하였으며, PL (photoluminescence) 발광 특성 및 압전류 특성을 분석하였다. 동일한 조건으로 양자점을 적층 하였을 때 크기 및 밀도의 변화에 의한 이중 PL peak을 관찰하였으며, TMIn의 유량을 조절함으로써 단일 peak을 갖는 균일한 크기의 양자점 적층 구조를 성장할 수 있었다. 적외선 수광소자 구조를 성장함에 있어서, 상부의 n-형 GaAs의 성장 온도가 600도 이상인 경우 PL 발광 세기가 급격히 감소하였고 이에 따른 압전류의 증가를 관찰하였다. 0.5 V 인가 전압에서 압전류의 온도 의존성에 대한 활성화 에너지의 크기는 성장온도가 580도인 경우 106 meV이고, 650도의 경우는 48 meV로 급격히 낮아졌다. 이는 고온의 성장 온도에 의한 InAs 양자점과 In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 양자우물구조 계면에서의 열적 상호 확산에 의하여 비발광 천이가 증가되었기 때문이다.

주제어 : 양자점, 적외선 수광소자, InAs, MOCVD

## I. 서 론

적외선 수광소자(Infrared Photodetector)는 근적외선에서 원적외선 영역에 이르는 광범위한 파장 범위의 적외선을 이용하는 기기로서 대상물이 방사하는 적외선 영역의 에너지를 흡수하여 이를 영상화할 수 있는 장비이다. 적외선 관련 기술은 2차 세계대전 기간에 대동하였으며, 현재에는 원거리 감지기술 등과 접목되면서 그 활용 분야가 다양해지고 있다. 기존의 Bolometer 형식의 열 감지 소자는 반응 속도가 느리고 측정 감도가 낮은 단점이 있으며, MCT (HgCdTe)를 이용한 적외선 검출기의 경우 높은 기계적 결합과 77 K 저온에서 동작해야하기 때문에 발생하는 추가 비용 등이 문제점으로 지적되고 있다 [1]. 이에 반해 화합물 반도체 자기조립 양자점(self-assembled quantum dot)을 이용한 적외선 수광소자(quantum dot infrared photodetector, QDIP)는 양자점이 가지는 불연속적인 에너지 준위로 인하여, 높은 내부 양자 효율과 상온 근처의

고온 동작 가능성을 기대할 수 있으며, 수직 입사되는 빛을 검출 할 수 있는 장점을 지니고 있다 [2-8].

양자점의 내부 에너지 준위는 운반자가 구속되는 공간의 크기, 양자점을 둘러싸는 물질의 특성 및 응력 분포상태 등에 따라 변화하게 된다. 내부 에너지 준위의 변화는 운반자 간의 재결합(또는 천이) 시 방출 및 흡수되는 에너지의 크기를 변화시키기 때문에 물질의 방출 또는 흡수하는 파장대가 달라진다. 이러한 양자점의 내부 준위간(intersubband) 천이를 이용한 적외선 수광소자 연구는 최근까지 활발히 이루어지고 있으며 MBE (molecular beam epitaxy)를 이용하여 80 K에서 동작하고 1,024×1,024 픽셀을 가지는 초점면 배열(focal plane array, FPA)을 개발하기에 이르렀다 [4]. 이에 비하여 유기금속화학기상증착법(metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)을 이용한 연구는 비교적 고온의 성장온도가 필요하고, 고품질의 양자점 구조를 성장하기가 보다 까다롭기 때문에 현재 소수의 그룹에서 연구되고 있다 [6]. 최근 들어 77 K에서  $1.1 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 의 높은

\* [전자우편] eyoon@snu.ac.kr

검출률(detectivity,  $D^*$ )을 갖는 단일 소자가 발표되는 등의 발전이 이루어지고 있지만, 실제 소자에 응용하고 고온 동작 가능성을 실현하기 위해서는 높은 암전류에 의한 소자 특성 열화를 해결해야 한다 [7].

본 연구에서는 MOCVD를 이용하여 적층 InAs/InGaAs DWELL (dot-in-a-well) 구조를 성장하고 소자에 응용하였다. 균일한 적층 양자점 성장을 위해서 원자현미경(atomic force microscopy)을 이용하여 각 층의 양자점의 크기와 밀도를 관찰하고, PL (photoluminescence)을 통해 발광 특성을 확인하였다. 이를 통해 최적화된 성장 조건을 이용하여 n-i-n 형 QDIP를 제작하였고, 성장 조건에 따른 광학적, 전기적 특성에 대해 연구하였다.

## II. 실험방법

본 실험에서 사용된 샘플은 GaAs (001) 기판위에 MOCVD를 사용하여 76 torr 조건에서 증착되었다. 3족 소스로는 trimethylgallium (TMGa)과 trimethylindium (TMIn)를 사용하였고, 5족 소스는 아신(arsine,  $AsH_3$ )이 사용되었다. 710도에서 열처리를 통해 기판의 산화막 및 수증기 등을 제거하고, GaAs 버퍼층을 성장하였다. 균일한 양자점 성장을 위해서 주기적인 아신 소스의 공급 및 차단(periodic arsine interruption, PAI) 방법을 사용하여 510도에서 InAs 양자점을 성장하였다. 이 방법은 자기조립 양자점을 성장 하는데 있어서 비정상적으로 큰 3D (three-dimensional) 구조가 생기는 것을 막아주어 균일한 양자점 성장 및 우수한 광특성을 가지도록 한다 [9,10]. 또한 양자점 하부의 버퍼층 및 덮개층으로  $In_{0.1}Ga_{0.9}As$  박막을 같은 온도에서 성장시켜 InAs 양자점이 InGaAs 양자우물 구조 안에 위치하는 DWELL 구조를 형성하였고, 이후 510도에서 GaAs 층을 5 nm 두께로 성장한 후 580도에서 50 nm 두께의 GaAs를 성장하였다. 이 과정을 반복하여 3층의 적층 구조를 성장하였다. 각 층의 양자점 형성을 연구하기 위하여, 마지막 3층에서는 양자점이 드러나는 구조를 별도로 성장하여, 양자점의 밀도 및 크기 정보를 원자현미경을 통해 분석하였고, PL 측정을 통해 발광 특성을 확인하였다. 최종적으로 Fig. 1과 같은 n-형 GaAs 사이에 3층으로 적층된 DWELL 구조가 위치하는 n-i (intrinsic)-n 구조를 형성하였다. 하부의 n-형 GaAs는 710도에서 820 nm 두께로 성장하였고, 상부의 n-형 GaAs

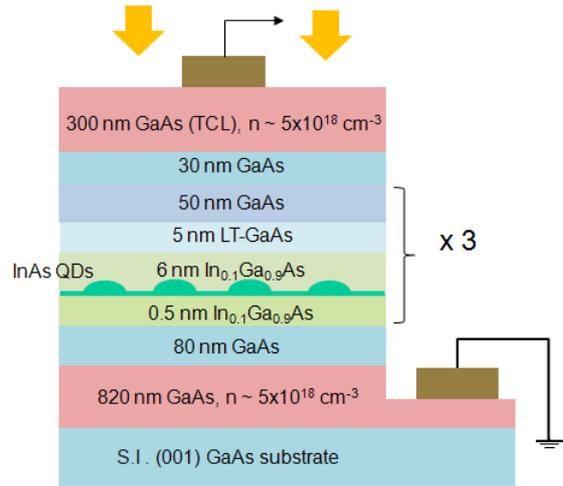


Figure 1. Schematic diagram of InAs/InGaAs dot-in-a-well structure for infrared photodetector.

TCL (top contact layer)은 650도에서 580도까지 온도를 변화 시키며 각각 성장하였다. 상하부 n-형 GaAs의 도핑 농도는  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 로 하였다.

광도화(photolithography) 공정과 습식 식각(wet etching) 방법을 사용하여  $400 \mu\text{m}$  지름을 갖는 원형 mesa 형태의 소자를 만들었다. 에칭 용액으로는  $[H_2SO_4:H_2O_2:H_2O=1:8:40]$ 을 사용하였고, 식각률은 약  $16 \text{ nm/s}$ 이다. n-형 GaAs에 대한 전극 금속으로서 thermal evaporator를 사용하여 AuGe/Ni/Au 층을 각각 500, 300, 3,000 Å 성장하였고, 오믹 전극을 형성하기 위하여 RTA (rapid thermal annealing)를 이용하여 열처리 작업을 수행하였다. 소자의 구조 분석 및 결함 관찰을 위해서 JEOL사의 JEM-3000F 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM)을 사용하였다. QDIP의 온도별 암전류 측정은 He cryostat과 semiconductor parameter analyzer (HP4156)를 이용하여 측정하였으며, mesa 구조 아래에 위치한 전극을 접지 전극으로 삼았다.

## III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2(a)는 단층으로 성장된 InAs 양자점의 AFM 이미지를 나타낸다. 밀도는  $4.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 이고, 평균 높이는 5.8 nm이다. 이렇게 성장된 양자점을 적층하여 3층의 양자점에 대한 AFM 이미지를 Fig. 2(b)와 같이 관찰하였다. 단층 양자점에 비해 밀도가  $7.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 로 늘어났고, 평균 높이가 5.1 nm로 감소하였다. 일반적으로 상부의 양자점이

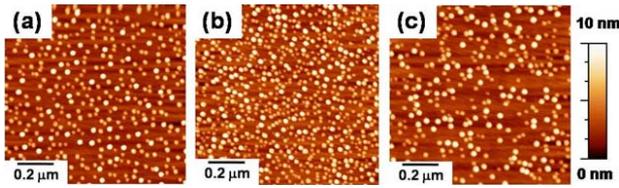


Figure 2.  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$  AFM images for InAs QDs of 1st period (a), of 3rd period (b) and on 3rd period whose growth condition was tuned on purpose (c).

성장할 때 하부의 양자점 구조가 영향을 미치기 위해서는 약 50 nm 이하의 간격이 필요하다고 알려져 있다. 이는 하부의 양자점에 의한 인장 응력(tensile strain)이 양자점의 수직 방향으로 누적되는 현상에 의한 것이며, 이 때문에 상부의 양자점 크기는 커지고 밀도는 감소하는 현상이 나타난다 [11,12]. 하지만 본 실험의  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  덮개층 및 GaAs 삽입층으로 구성된 층간 간격은 약 60 nm이므로, 이러한 하부 양자점에 의한 인장 응력의 영향은 없는 것으로 생각된다. 양자점의 성장은 온도, 공급 유량 등의 공정 변수뿐만 아니라, 표면의 원자 배열(surface reconstruction)에 따른 표면 에너지, 거칠기(roughness), 응력 분포 등 다양한 원인에 의해 결정된다. 일반적으로 InAs의 증착량이 증가함에 따라 양자점의 밀도가 증가하는 것으로 보고되고 있다 [13]. 이는 표면 거칠기와 응력 상태의 불균일에 따라 양자점 형성의 임계두께가 국부적으로 다르게 되므로, InAs 증착량이 증가할수록 이러한 임계 두께를 만족하는 부분이 증가하기 때문에 양자점의 밀도가 증가되는 것으로 설명된다. 따라서 본 실험에서는 공정 변수 중 TMIIn의 유량을 조절하여 양자점의 성장을 관찰하였다. Fig. 2(c)는 1층의 양자점 성장에 사용된 TMIIn의 유량을 80%로 낮추어 성장된 적층 구조에서 3층의 양자점 표면의 AFM 이미지이다. 그 결과 밀도는  $3.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 이고 평균 높이는 5.6 nm로서 1층의 양자점과 비슷한 크기 및 밀도를 얻는데 성공하였다.

이러한 적층 양자점 구조 성장 시 양자점의 크기 및 밀도가 변하는 문제는 PL 발광 특성에도 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. Fig. 3은 Fig. 2에서 사용된 적층 양자점 샘플의 PL 측정 결과를 나타낸다. 각 층의 양자점 성장 조건을 같게 한 경우(sample A1, A2), 1,260 nm와 1,330 nm 부근에서 이중 peak을 가지는 특성을 보인다. 이것은 각 층의 양자점 크기가 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다. 이에 반하여 TMIIn 유량을 조절하여 각 층간의 양자점을 균일

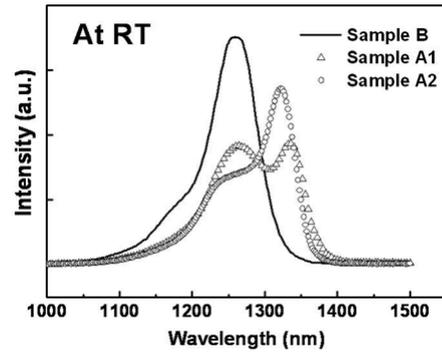


Figure 3. Room-temperature photoluminescence spectra from InAs/InGaAs dot-in-a-well structures with different growth condition. Sample A1 and A2 are as-grown structure with 2-period of QDs and the growth condition of sample B is tuned on purpose.

하게 성장한 경우(sample B), 1260 nm의 단일 peak을 갖고 발광 강도가 증가된 PL 결과를 얻을 수 있었다. 반가폭(full-width-half-maximum, FWHM)은 약 42 meV이고, 1215 nm에서 여기준위 천이(excited-state transition)에 의한 peak이 관찰된다. 단일 peak을 갖는 적층 구조를 수광소자에 응용하였을 경우에는 좁은 파장 영역의 고감도 검출이 가능한 반면, 두 가지 크기의 양자점을 각각 적층한 구조는 이중 대역 또는 넓은 범위의 파장 영역을 검출하는데 적합하다 [14]. 따라서 양자점을 적층 성장할 때 양자점 크기를 목적에 맞게 조절하는 것은 소자 응용 연구에 매우 중요하다고 판단된다.

Fig. 4는 각 층간 양자점의 성장을 조절한 sample B의 TEM bright field 이미지이다. 측정 샘플의 화학적 조성에 민감한 측정 조건인  $\mathbf{g}=(200)$ 을 사용하여 양자점의 적층 이미지를 Fig. 4(a)와 같이 얻을 수 있었다. 앞서 Fig. 2와 함께 설명하였던 양자점에 의한 응력의 누적 분포와 각 층의 양자점 간 상호 간섭 현상이 없음을 확인할 수 있었다. 또한 zinc-blende 구조에서 주로 나타나는  $\mathbf{b}=a/2\langle 110 \rangle$  전위에 대해 민감한 측정 조건인  $\mathbf{g}=(220)$ 으로 관찰하였지만 측정 범위 안에서 관통 전위(threading dislocation)를 발견할 수 없었다 [15].

이렇게 최적화된 조건을 이용하여 n-형 GaAs 층이 양자점 위아래에 위치한 n-i-n 구조를 성장하였다. MOCVD에서 TMGa와  $\text{AsH}_3$ 을 사용한 GaAs의 성장은 600도에서 650도 사이의 온도에서 고품질의 박막을 형성할 수 있다고 알려져 있다 [16]. Fig. 5는 상부 300 nm 두께의 n-형 GaAs TCL의 성장 온도에 따른 양자점 구조의 발광 특성 변화를 나타낸다.

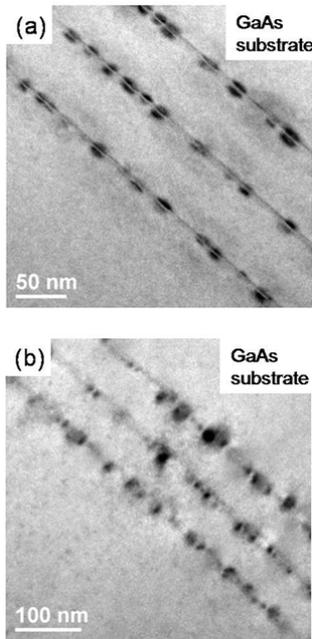


Figure 4. Bright field cross-sectional TEM image of 3-period InAs/InGaAs Dot-in-a-well structure taken under  $g=(200)$  (a), and  $g=(220)$  (b).

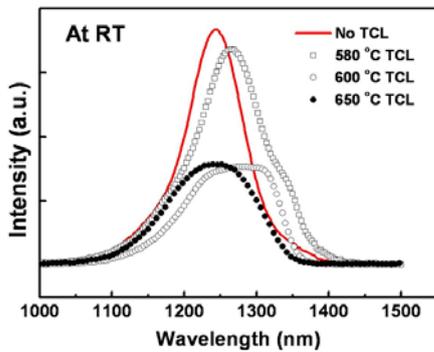


Figure 5. Room-temperature photoluminescence spectra from InAs/InGaAs dot-in-a-well structures with different growth temperature of n-type GaAs top contact layer (TCL).

TCL을 성장하지 않은 3층 적층된 구조의 발광 peak은 1,245 nm이었고, 반가폭은 약 63 meV를 나타냈다. 이에 반하여 600도와 650도에서 TCL을 성장한 경우에는 발광 세기가 50% 이상 줄어들었고, 반가폭은 약 90 meV 이상으로 증가하였다. 이러한 온도 범위에서는 GaAs의 성장 속도를 1.3 Å/s에서 2.6 Å/s로 증가하여 성장 시간을 줄인 경우에도 마찬가지로 발광 특성의 열화가 일어났다. 이에 반하여 580도에서 TCL을 성장한 경우에는 반가폭은 75 meV로 조금 증가하였지만 TCL이 없는 경우와 대등한 발광 세기를 나타내었다.

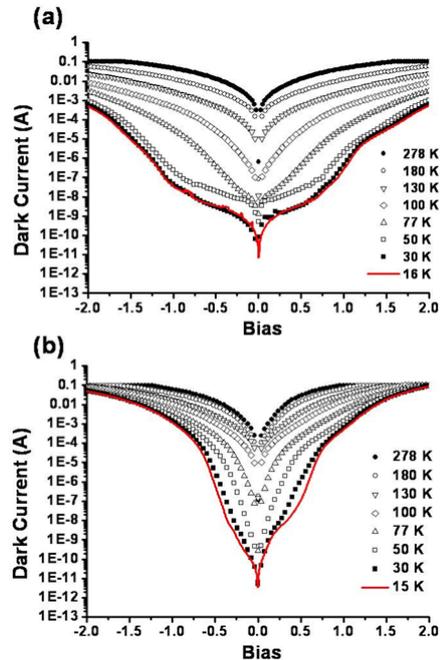


Figure 6. Temperature-dependent dark current for InAs/InGaAs dot-in-a-well structures with top contact layer grown at 580°C (a) and 650°C (b).

Fig. 6은 TCL의 성장온도를 각기 달리하여 성장된 QDIP 구조에 대한 온도별 암전류 측정 결과를 나타낸다. 전압에 대하여 전체적으로 대칭성을 보여주는 것은 소자 구조가 Fig. 1과 같이 n-i-n 구조의 대칭성을 갖기 때문이다. 50 K 이하에서  $\pm 1$  V 이상의 전압을 인가하였을 때 볼 수 있는 비대칭성은 양자점의 상부와 하부의  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  층의 두께 차이에 의한 전도대(conduction band) 구조의 이방성에 기인하는 것으로 해석된다. TCL의 성장온도가 580도인 경우(Fig. 6(a)) 50 K 이하에서는 전압에 대한 암전류의 증가 정도가 낮은 구간이 나타나며, 77 K 이상에서는 0의 전압 근처에서도 급격한 암전류의 증가를 보인다. 이에 반하여 TCL의 성장온도가 650도인 경우(Fig. 6(b)), 16 K의 극저온부터 암전류가 전압에 따라 매우 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 암전류의 온도 의존성을 자세히 살펴보기 위하여, 0.5 V 전압을 인가하였을 때의 암전류를 열 에너지(kT) 역수의 함수로 Fig. 7과 같이 나타내었다. 77 K 이상의 온도에서 암전류( $I_D$ )는

$$I_D \sim \exp(-\Delta E/kT) \quad (1)$$

와 같은 아레니우스(Arrhenius) 식을 따르는 것을 알 수 있으며, 암전류의 활성화 에너지(activation energy,  $\Delta E$ )는

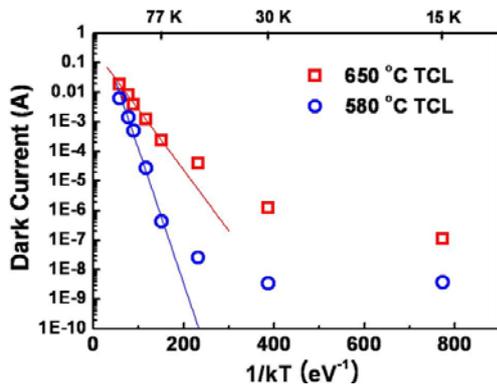


Figure 7. Dark current measured at the bias voltage  $V_b = 0.5$  V is plotted as a function of  $kT$ . Solid lines represent the linear fitting data.

TCL 성장 온도가 580도, 650도인 경우 각각 106 meV, 48 meV를 나타냈다. 암전류의 활성화 에너지는 양자점의 내부 에너지 준위와 이를 둘러싸고 있는 장벽(barrier) 간의 차이로 해석할 수 있다. 따라서 580도의 TCL 경우, 양자점에 의한 전자의 구속 정도가 보다 강한 것을 알 수 있다. InAs 양자점과  $In_{0.1}Ga_{0.9}As$  양자우물 구조 사이에 열에 의한 In과 Ga의 상호 확산(inter-diffusion)이 활발히 일어난 경우 실질적인 양자점의 크기가 줄어들게 되고, 이것은 양자점의 내부 에너지 준위와 장벽 간의 높이 차이를 줄여 들게 하는 동시에 기저 준위 간 천이 에너지는 증가시키기 때문에 일반적으로 발광 효율의 감소 및 PL peak의 청색 편이가 두드러지게 나타난다 [11, 17]. 또한 열에 의한 상호 확산은 계면에서의 중간층(intermediate layer)을 형성하거나 결함을 형성하여 장벽 중간에 새로운 준위를 형성하여 전자가 양자점 준위에서 InGaAs 또는 GaAs로 빠져나가는 확률을 높이거나, 포논(phonon)에 의한 비발광 천이(non-radiative transition)를 활발하게 하게 한다 [6]. Fig. 5에서 TCL 성장 온도에 따른 PL peak의 변화가 뚜렷하지 않기 때문에 양자점 내부 준위의 변화 보다는 주로 계면에서의 중간층 또는 결함 형성에 기인한 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 MOCVD를 이용하여 적층 InAs/InGaAs DWELL 구조를 성장하여 각 층의 양자점의 성장을 조절하는 연구를 수행하였고, 이를 이용하여 양자점의 전도대 내부의 에너지 준위 간 천이를 이용하는 n-i-n QDIP 구조를 성장

하여 성장 조건에 따른 PL 발광 특성과 암전류 특성을 연구 하였다. 균일한 적층 양자점의 성장을 위해서 원자현미경을 이용하여 각 층의 양자점의 크기와 밀도를 관찰한 결과, 단층의 양자점에 비해 적층된 양자점의 밀도가 증가하고 크기가 줄어드는 현상을 관찰하였다. 이러한 현상에 의해 적층된 구조에서 이중 PL peak을 관찰할 수 있었다. 하지만 TMIn의 유입량을 조절함으로써 양자점의 균일한 성장을 유도하였고, TEM을 통해 확인하였다. 이렇게 성장된 구조에서는 PL 측정 결과 단일 peak을 가지고 발광 세기가 증가되었다. 이와 같이 최적화된 성장 조건을 사용하여 QDIP 구조를 성장하는데 있어서, 상부의 n-형 GaAs TCL의 성장 온도가 600에서 650도 범위의 경우 발광 세기 및 암전류 특성이 크게 저해되었고, 580도로 낮춘 경우 이러한 영향을 해소할 수 있었다. 0.5 V 인가 전압에서의 암전류의 온도 의존성을 분석한 결과, 650도의 경우 580도에 비하여 암전류의 활성화 에너지가 급격히 감소하였다. 이것은 PL 발광 세기의 감소와 연관되는 것으로, 양자점과 이를 둘러싸고 있는 InGaAs 간의 열적 상호 확산에 의하여 양자점으로부터 구속된 전자의 탈출 및 비발광 천이가 증가하였음을 나타낸다. 이상적인 적외선 수광소자를 위해서는 낮은 암전류가 필수적이며, 온도가 증가함에 따른 암전류의 증가 정도가 적어야 한다. 따라서 MOCVD를 이용한 InAs/InGaAs QDIP 구조 성장에 있어서 양자점 성장 이후 박막의 성장 온도를 조절하여 광학적, 전기적 특성의 열화를 줄이는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원, 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No.R11-2005-048-00000-0), 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업(WCU)의 지원(R31-2008-000-10075-0)과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-신기술융합형 성장 동력사업(No.2009-0082020)의 지원을 받아 수행되었다.

#### 참고문헌

- [1] A. Rogalski, *Progress in Quantum Electronics* **27**,

- 59 (2003).
- [2] 남형도, 송진동, 최원준, 조운조, 이정일, 최정우, 양혜석, 한국진공학회지 **15**, 216 (2006).
- [3] S. D. Gunapala, S. V. Bandara, C. J. Hill, D. Z. Ting, J. K. Liu, S. B. Rafol, E. R. Blazejewski, J. M. Mumolo, S. A. Keo, S. Krishna, Y.-C. Chang, and C. A. Shott, IEEE J. Quantum Electron **43**, 230 (2007).
- [4] D. Z. Y. Ting, S. V. Bandara, S. D. Gunapala, J. M. Mumolo, S. A. Keo, C. J. Hill, J. K. Liu, E. R. Blazejewski, S. B. Rafol, and Y.-C. Chang, Appl. Phys. Lett. **94**, 111107 (2009).
- [5] 김준오, 신현욱, 최정우, 이상준, 김창수, 노삼규, 한국진공학회지 **18**, 108 (2009)
- [6] L. Fu, I. McKerracher, H. H. Tan, C. Jagadish, N. Vukmirovic, and P. Harrison, Appl. Phys. Lett. **91**, 073515 (2007).
- [7] J. Szafraniec, S. Tsao, W. Zhang, H. Lim, M. Taguchi, A. A. Quivy, B. Movaghar, and M. Razeghi, Appl. Phys. Lett. **88**, 121102 (2006).
- [8] S. Chakrabarti, A. D. Stiff-Roberts, P. Bhattacharya, S. Gunapala, S. Bandara, S. B. Rafol, and S. W. Kennerly, IEEE Photonic. Tech. Lett. **16**, 1361 (2004).
- [9] Y. Lee, E. Ahn, J. Kim, P. Moon, C. Yang, E. Yoon, H. Lim, and H. Cheong, Appl. Phys. Lett. **90**, 033105 (2007).
- [10] J. Kim, C. Yang, U. Sim, J. Lee, E. Yoon, and Y. Lee, Thin Solid Films **517**, 3963 (2009).
- [11] J. Tatebayashi, Y. Arakawa, N. Hatori, H. Ebe, M. Sugawara, H. Sudo, and A. Kuramata, Appl. Phys. Lett. **85**, 1024 (2004).
- [12] 조중석, 김상효, 황보수정, 장재호, 최현광, 전민현, 한국진공학회지 **18**, 352 (2009).
- [13] G. S. Solomon, J. A. Trezza, and J. S. Harris, Jr., Appl. Phys. Lett. **66**, 3161 (1995)
- [14] E. T. Kim, Z. Chen, M. Ho, and A. Madhukar, J. Vac. Sci. Technol. B **20**, 1188 (2002).
- [15] T. Asano, A. Madhukar, K. Mahalingam, and G. J. Brown, J Appl. Phys. **104**, 113115 (2008).
- [16] G. B. Stringfellow, *Organometallic vapor-phase epitaxy: theory and practice 2nd edition* (Academic Press, San Diego, 1999), pp. 393.
- [17] J. Tatebayashi, N. Hatori, M. Ishida, H. Ebe, M. Sugawara, Y. Arakawa, H. Sudo, and A. Kuramata, Appl. Phys. Lett. **86**, 053107 (2005).

# Study of Multi-stacked InAs Quantum Dot Infrared Photodetectors Grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition

Jungsub Kim<sup>a</sup>, Seung-kyu Ha<sup>b</sup>, Changjae Yang<sup>a</sup>, Jaeyel Lee<sup>a</sup>,  
Sehun Park<sup>a</sup>, Won Jun Choi<sup>b</sup>, and Euijoon Yoon<sup>a,c,d\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744

<sup>b</sup>Nano Convergence Devices Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791

<sup>c</sup>Hybrid Materials Program (WCU), Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744

<sup>d</sup>Department of Nano Science and Technology, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Suwon 443-270

(Received February 16, 2010, Revised March 16, 2010, Accepted March 17, 2010)

We grew multi-stacked InAs/In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As DWELL (dot-in-a-well) structure by metal organic chemical vapor deposition and investigated optical properties by photoluminescence and I-V characteristics by dark current measurement. When stacking InAs quantum dots (QDs) with same growth parameter, the size and density of QDs were changed, resulting in the bimodal emission peak. By decreasing the flow rate of TMIn, we achieved the uniform multi-stacked QD structure which had the single emission peak and high PL intensity. As the growth temperature of n-type GaAs top contact layer (TCL) is above 600°C, the PL intensity severely decreased and dark current level increased. At bias of 0.5 V, the activation energy for temperature dependence of dark current decreased from 106 meV to 48 meV with increasing the growth temperature of n-type GaAs TCL from 580 to 650°C. This suggest that the thermal escape of bounded electrons and non-radiative transition become dominant due to the thermal inter-diffusion at the interface between InAs QDs and In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As well layer.

Keywords : Quantum dot, Infrared photodetector, InAs, MOCVD

\* [E-mail] eyoon@snu.ac.kr