≪연구논문-중점 주제≫ 한국진공학회지 제15권 2호, 2006년 3월, pp.186~193

양자간섭소자를 위한 InGaAs/InGaAsP/InP 양자점 분자구조 연구

김진석[1] · 김은규[1*] · 정원국[2]

[1]한양대학교 물리학과, 서울 133-791
[2]성균관대학교 재료공학과, 수원 440-746

(2006년 1월 20일 받음)

유기금속화학기상증착법으로 InGaAs/InGaAsP/InP 양자점 분자구조를 두 양자점 층간의 거리가 10 nm가 되도록 성장하여 성장된 구조에 대해 C-V, DLTS 및 PL 등의 전기 광학적 물성측정을 하였다. 그 결과 큰 양자점은 작은 양자점과 비교하여 장벽물질의 전도대역 가장자리로부터 먼 쪽에 에너지 준위가 형성되어 있음을 확인하였다. 큰 쪽 양자점에는 최소한 2개 이상의 에너지 준위에 운반자를 포획시킬 수 있음이 확인되었는데, -4 V의 역전압 하에서 측정된 양자점 분자구조의 에너지 준위는 장벽 가장자리로부터 0.35, 0.42, 0.45 eV 의 깊이에 각각 존재하였다. 인가된 전압의 변화에 대하여 약한 전기장 하에서는 양자점 분자구조의 에너지 준위들이 서로 결합되어 있다가 전기장이 증가하면서 이들 두 에너지 준위가 확연히 분리되는 모습을 확인할 수 있었다.

주제어 : 양자점 분자구조, 양자간섭소자, InGaAs/InGaAsP/InP

I. 서 론

1980년대 후반에서부터 지금까지 궁극의 저차원 구조체(low-dimensional structure)라고 할 수 있는 양자점(quantum dot)에 대해 다양한 많은 연구가 수행되고 있다 [1-3]. 저차원 구조체란 띠간격(band gap)이 서로 다른 물질을 드브로이(de Broglie) 파장 정도의 크기로 이종접합 시킨 구조로서 이렇게 형성된 에너지띠 구조에 의해 전자(electron)나 홀(hole)과 같은 운반자(carrier)의 자유로운 이동이 제한되게 되고, 이 때문에 이들 운반자가 불연속적인 에너지 준위를 가지게 되는 구조이다. 저차원 구조체는 운반자의 이동을 제한하는 차원에 따라 각각 양자우물(quantum well), 양자선(quantum wire) 및 양자점(quantum dot)이 된다 [4]. 이들 중 양자우물의 경우는 1970년대 초반에 개발되어 현재 그 특성이 광범위하게 연구되었고, 다양한 분야에 응용되고 있다 [5, 6]. 이에 반해 양자선이나 양자점의 경우는 이론적인 예측이나 기본적인 물성 측정은 많은 연구 그룹에 의해 수행되었으나 효과적인 성장제어가 쉽지 않아 이의 응용을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

양자점은 그 특성이 수소원자나 양자역학에서 이야기하는 상자속의 입자(particle in a box)와 같아 달리 인공원자(artificial atom) 혹은 초원자(super atom)라고도 불리는데 [4], 내부의 운반자가 에너지 상태(energy state)나 스핀(spin)과 같은 양자상태를 가질 수 있고 내부에 전자나 홀을 가둬둘 수 있기 때문에 이를 이용한 저장장치나 논리소자(logic device) 및 광소자(optical device)로의 응용이 기대되고 있다. 이 중에서 광소자의 경우 단일광자광원(single electron source)을 제외하고는 양자점의 위치 조절 기술이 소자 제작을 위한 필요조건이 아니기 때문에 자발형성(self-assembled) 양자점을 이용하여 수년 전부터 레이저 다이오드 등이 개발되었으나 [7, 8] 논리소자의 경우 양질의 양자점을 개발할 수 있는 기술과 더불어 이 양자점의 효과적인 위치 통제 및 게이트 제작과 같은 소자제작 공정 기술이 필요하나 현재로서는 이 기술이 만족할 만한 수준이 아니므로 현재까지도 단전자트랜지스터(single electron transistor), 공명투과다이오드(resonance tunneling diode) 및 궁극적으로 양자컴퓨터에 응용될 양자비트(qubit) 등의 응용을 위한 기초물성 측정이 진행되고 있다 [9-11]. 특히 양자비트의 경우

* [전자우편] ek-kim@hanyang.ac.kr

양자상태의 간섭, 상관(correlated) 및 얽힘(entangle)이라는 고유한 특성을 만족할만한 고체 소자로서는 양자점이 유력한 것으로 인식되고 있고 때문에 양자점을 수직으로 적층시키거나 수평으로 나란하게 성장하여 이들 양자점 내부에서 일어나는 물리적 특성을 현재 다각도로 측정하고 있다. 이렇게 수직 혹은 수평으로 결합된 양자점들의 구조를 양자점이 인공원자라 불리는데 대응하여 양자점 분자구조(quantum-dot molecules)혹은 양자점 결합구조(quantum-dot coupled structure)라고 불리고 있다 [12].

본 연구에서는 수직으로 적층된 InGaAs/InGaAsP/InP 두 양자점 층 사이의 간격을 변화시키면서 성장하였고, 이렇게 성장된 시료에 대해 전기용량법(capacitance-voltage, C-V) 및 과도전기용량분광법(deep-level transient spectroscopy, DLTS)과 같은 전기적 측정법을 이용하여 양자점 층간 간격 및 외부 전기장의 크기 변화에 따른 양자점 분자구조의 에너지준위 간의 상호연관성을 살펴보았다. 또한 photoluminescence (PL)과 같은 광학적 물성 측정도 병행하였다.

II. 실험 및 측정

본 연구에 사용된 InGaAs/InGaAsP/InP 양자점 분자구조는 InP (001) 기판위에서 유기금속화학기상증착법(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)을 이용하여 76 Torr의 압력 하에서 trimethylindium (TMIn), trimethylgallium (TMGa), AsH_3, PH_3를 공급하여 성장하였다. 여기서 InGaAs 및 InGaAsP 각 물질의 조성비는 성장온도와 각 공급물질의 비율로서 조절하였고, 양자점의 위치 제어 및 크기 제어는 이전의 성장 조건을 참고하여 성장하였다 [13]. 먼저 n-InP 기판 위에 1 μm 두께의 buffer 층을 620 °C의 온도에서 성장하였고 540 °C로 성장 온도를 낮춘 다음 InGaAsP 장벽층(barrier layer) 및 InGaAs 양자점 층을 층간 거리를 10 nm로 각각 설정하여 시료를 성장하였다. 이때, 성장한 양자점 시료에 대한 원자력간현미경(Atomic Force Microscopy) 측정결과, 양자점의 밀도는 1×10^{10} cm^{-2} 로서, 크기는 높이가 3.5~6 nm, 지름이 35~45 nm 정도인 반구형 모양을 가지고 있다. 또한, 이들 시료에 대한 DLTS 측정을 용이하게 하기 위하여 아래층의 양자점을 위층 양자점보다 크게 되도록 성장하였으며, 마지막으로 620 °C의 온도에서 120 nm 두께의 덮개층 (capping layer)을 성장하였다. 이렇게 성장된 시료의 C-V 및 DLTS 측정을 위해 금속-절연체-반도체 (metal-insulator-semiconductor, MIS) 구조를 형성하였다. 즉, 성장된 시료위에 25 nm 정도 두께의 Si_3N_4 층을 plasma enhanced chemical vapor deposition 기법을 이용 증착한 다음 thermal evaporator로 금으로 된 전극을 shadow mask를 이용하여 0.5 mm 지름으로 증착하였다. 그리고 시료의 뒷면 즉 기판 쪽에 인듐(indium) 땜을 하여 ohmic 시켰다. 이렇게 만들어진 전체 시료구조는 그림 1과 같다.

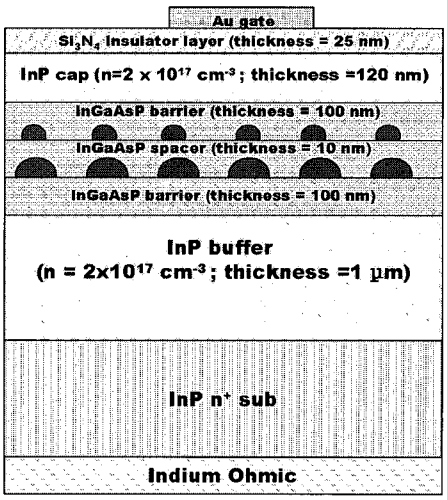

그림 1. InGaAs/InGaAsP/InP 양자점 적층 구조.

본 연구에서 이용한 DLTS 법은 깊은준위(deep level)에 전하 운반자가 포획되어 있다가 열적에너지에 의해 방출되는 비율을 측정하여 이 준위의 에너지 크기 및 단면적을 구해내는 방법이다. 여기서 깊은준위에 운반자가 있는지 없는지는 공간전하에 의한 전기용량의 측정으로 구해낼 수 있다 [14]. 그리고 깊은준위에 운반자를 채우는 방법은 역방향 전압하에서 채움펄스(filling pulse)를 인가해 줌으로써 페르미 준위를 조정하여 채워지게 된다. N형 반도체내 전자덫(electron trap)의 경우, 깊은준위에 전자를 채운 뒤(펄스전압을 가한 뒤) 시간에 따른 전기용량의 변화로 다음 식으로 표현 할 수 있다.

$$C(t) = C_0[1 - \frac{N_t}{2N_d} exp(-e_n t)] \quad (1)$$

여기서, $C(t)$는 펄스전압을 가한 뒤 시간 t의 변화에 따른 전기용량(capacitance)이고, C_0은 측정 역방향전압에서 측정한 전기용량 값이다. N_d와 N_t는 각각 donor 농도와 깊은준위 전자덫의 농도를 나타내며, e_n은 열방출률(thermal emission rate)이다. 기본적으로 깊은준위에 전자가 차면 공간전하가 줄어듦으로 인해 전기용량은 낮아지고(n-type의 경우) 이를 제거하면 운반자가 포획된 준위에서 탈출함으로 인해 전기용량이 증가하게 된다. 이 경우 C_0값은 시간이 무한히 지나 모든 운반자가 준위로부터 탈출한 상태의 전기용량이다. 그리고 열방출률 e_n은 다음 식과 같이 주어진다.

$$e_n = A_n \sigma_n T^2 exp(\frac{\triangle E_a}{kT}) \quad (2)$$

여기서, $A_n = 4\sqrt{6}\pi^{\frac{3}{2}} k^2 m_n^* / h^3$ 이고, k는 볼쯔만상수, 그리고 $\triangle E_a$는 전자 덫의 활성화에너지로서 $E_c - E_t$가 된다.

한편, DLTS 신호는 다음 식과 같이 정의한다.

$$S(\tau) \equiv \frac{1}{C_0}[C(t_2) - C(t_1)] \quad (3)$$

여기서, 비율창문(rate window) 의 개념을 도입하여 즉, sampling time t_1과 t_2의 비를 K $(t_2 = Kt_1)$로 했을 때, DLTS 신호의 최대치가 나타나는 시정수 $\tau = 1/e_n = \frac{K-1}{lnK} t_1$ 로 정의한다. 따라서, 비율창문 변화에 따른 DLTS 신호 S가 극대가 되는 지점 S_{max}에서의 온도 T를 각각 측정함으로써 활성화에너지($\triangle E_a$)와 열방출단면적 (σ_n)을 구해낼 수 있다.

즉, 식 (2)에서 적절히 인자들을 이항한 뒤 로그를 취하면,

$$\log\frac{e_n}{T^2} = -\frac{\Delta E_a \cdot log(e)}{1000k} \cdot \frac{1000}{T} + logA_n\sigma_n \quad (4)$$

와 같이 되는데, 이를 1000/T와 $\log(en/T^2)$ 그래프 즉 Arrhenius Plot을 취하면, 기울기로부터 ΔE_a 값을 얻을 수 있고 절편으로부터 σ_n 값을 구할 수 있다 [15, 16].

이와 같은 DLTS 측정을 위해 본 연구에서는 HP 4280A의 internal mode 및 Boonton7200 capacitance meter 와 HP8116A pulse generator, SR640 low pass filter, 데이터 수집보드(DAQ)가 결합된 시스템을 이용하여 전기용량의 시간변화를 측정하였으며 헬륨 순환 냉각 방식의 저온장치(cryostat)를 이용하여 측정 온도를 11~380 K 범위 내에서 0.1 K 이내의 오차로 조절할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

최종적으로 MIS구조로 만들어진 시료에 대해 DLTS 측정조건의 결정 및 소자 특성을 파악하기 위하여 먼저 C-V 측정을 수행하였다. 온도를 변화시켜 가면서 C-V 측정을 수행하였는데, 대표적인 온도에서의 결과가 그림 2(a)에 나타나 있다. 뒤에 설명될 DLTS 결과를 먼저 도입하여 설명하면 300 K에서는 양자점 내부의 운반자 (이 시료의 경우 n-형 이므로 전자) 가 양자점으로부터 빠른 시간에 열적으로 활성화(activation)되어 방출(emission)될 수 있으므로 C-V 이력곡선(hysteresis)이 크게 나타나지 않지만, 200 K에서는 빠른 시간에 방출되기에 열적인 에너지(온도)가 부족하고 때문에 C-V 이력곡선이 크게 나타나는 모습을 볼 수 있다. 더구나 200 K에서 C-V 이력곡선은 이중으로 형성되는 것을 볼 수 있는데, 이는 적층된 2층의 양자점 각각의 영향 때문으로 예상된다. 이렇게 측정된 C-V 결과로부터 운반자분포(carrier depth profile)를 구하였는데, 그림 2(b)에 표시하였다. 사실 정확한 운반자분포를 구하려면 Si_3N_4 절연층 및 InGaAsP 장벽층의 유전상수 및 두께 등을 고려하여 도출하여야 하나 정확한 유전상수의 도출 및 깊이에 따른 이의 고려가 쉽지 않기 때문에, 시료 전체가 InP로 구성되어 있고 이 위에 금속-반도체 구조로 형성되어 있다고 가정하여 C-V 곡선으로부터 운반자분포를 도출하였다. 따라서, 정확하지는 않지만 기본적으로 두 부분에서 운반자가 많이 존재함을 알 수 있다. 이렇게 운반자 농도분포가 높게 나타나는 것은 양자점이나 양자우물에서의 양자상태에서 많은 운반자들을 포획하기 때문인데, 이는 양자구조의 존재를 나타낸다. 따라서 두 개의 양자점 층이 매우 근접해 있음을 확인할 수 있다.

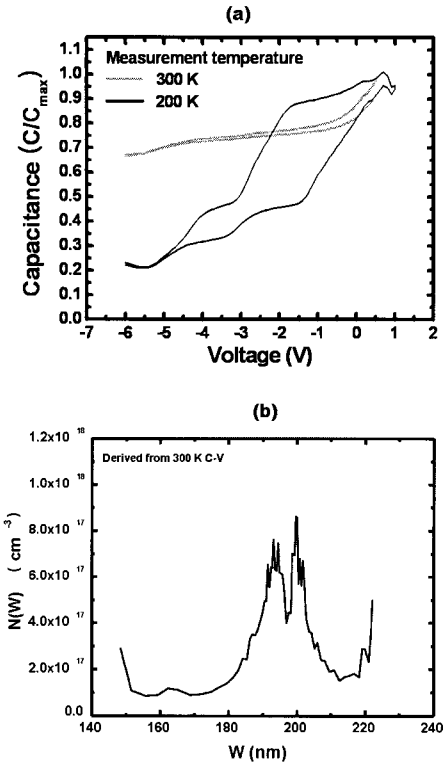

그림 2. (a) 200 K와 300 K온도에서 측정된 C-V 결과, (b) 300 K에서의 carrier depth profile.

한편, 양자점 적층구조의 시료에 대한 광학적 물성분석을 위해 PL측정을 수행한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 1300 nm에서 1600 nm 사이에서 peak들이 나타났는 데, 신호의 모양이 비대칭으로 나타났다. 만약 대칭이라면 하나의 에너지준위 간 천이(transition)가 여러 가지 요인 때문에 퍼짐(broadening)이 일어난 것이라고도 해석될 수 있는데, 대칭이 아니기 때문에 최소한 둘 이상의 천이가 일어났음을 확인할 수 있다. 정확히 몇 가지의 천이가 섞여있는지 알 수 없지만, multi-peak fitting을 이용하여 PL신호를 분리하여 보았다. 그림3에는 두 개의 신호로 가정한 fitting 결과를 표시하였는데, 약 75 meV의 천이 에너지 차이를 가지는 두개의 신호가 있음을 보여주고 있다. 이때 에너지가 작은 천이 쪽이 강도(intensity)가 높음을 볼 수 있다. 일반적으로 직접천이의 PL강도는 에너지 준위에 존재하는 결합 운반자의 수에 비례하는 것으로 고려해 볼 수 있는데, 강도가 높을수록 많은 운반자가 높은 에너지 준위에 존재하다가 낮은 에너지 준위로 천이함을 나타내므로, 천이에너지가 낮은 쪽의 PL강도가 큰 것은 이후에 설명될 DLTS 결과와 잘 부합된다.

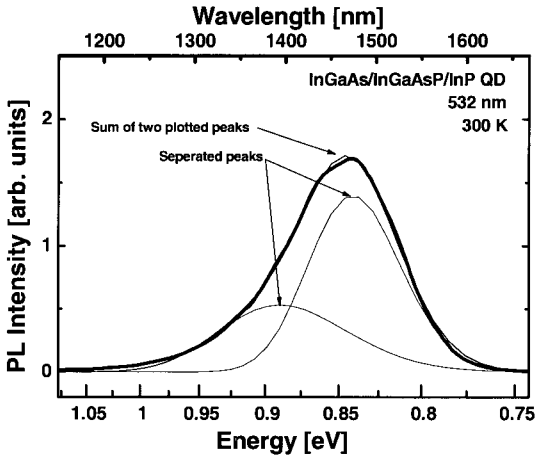

그림 3. 양자점 분자구조에 대한 상온 Photoluminescence 측정결과. PL 신호에 대한 multi-peak fitting결과 2개 이상의 신호가 겹쳐진 것으로 나타났다.

그림 4는 측정전압에 따른 DLTS 측정결과를 나타낸 것으로서, 모든 조건에서 기본적으로 두 그룹의 신호로 분리됨을 볼 수 있으며, 신호의 크기는 고온 쪽의 신호(활성화 에너지가 큰 쪽)가 저온 쪽의 신호에 비해 큰 것을 보여주고 있다. 여기서 신호의 크기는 에너지준위의 농도 또는 양자상태에 포획되었던 운반자의 수와 관계된다. 또한, PL에서 나타나는 천이 에너지와 DLTS에서 나타나는 활성화 에너지는 서로 관계를 가지게 된다. 왜냐하면, PL은 양자점의 전도대역에 존재하는 에너지준위로부터 가전자 대역에 존재하는 에너지준위로의 천이를 보여주는데 반해, DLTS의 활성화에너지는 양자점의 전도대역 에너지준위로부터 장벽 물질의 전도대역 가장자리까지의 에너지 차를 의미하기 때문에 PL의 에너지가 커지면 상대적으로 활성화 에너지는 감소하는 모습을 갖게 된다. 따라서 PL의 높은 에너지에서 나타나는 신호와 DLTS에서의 낮은 온도에서 나타나는 신호가 서로 연관된다. 이렇게 해석하면 두 PL 피크 신호의 크기 및 모양이 상당히 일치함을 볼 수 있다. 여기서 두 그룹의 DLTS 신호를 모두 양자점에서 방출되는 운반자의 신호로 간주할 수 있는 것은 이전 측정에서 InP bulk 시료 및 양자점이 성장되지 않고 InAs 물질만 삽입된 시료 즉, InAs/InP 단층 양자점 시료에서는 그림 4

표 1. 인가된 전압의 변화에 따라 분석된 DLTS parameters. 여기서 ΔEa 와 σ 는 각각 활성화에너지와 열방출단면적을 나타낸다.

Signal / Bias	E2		E4		E6		E8	
	ΔE_a(eV)	$\sigma(cm^2)$	ΔE_a(eV)	$\sigma(cm^2)$	ΔE_a(eV)	$\sigma(cm^2)$	ΔE_a(eV)	$\sigma(cm^2)$
0V~−2V	0.30	3.20×10^{-18}	0.36	3.39×10^{-17}	0.38	8.19×10^{-18}	0.42	5.70×10^{-17}
−2V~−4V	0.53	1.19×10^{-13}	0.35	1.78×10^{-17}	0.42	6.76×10^{-17}	0.45	1.14×10^{-16}
−4V~−6V	0.25	2.45×10^{-19}	0.37	1.28×10^{-17}	0.44	8.41×10^{-17}	0.48	2.21×10^{-16}

와 같은 위치에 신호가 나타나지 않았기 때문이다 [17]. 특히 다른 두 시료에서는 전혀 다른 위치에서 신호를 검출하였으나 단층 양자점 시료에서의 결과는 높은 온도 쪽에서 나타나는 신호와 비슷한 위치에서 DLTS 신호가 나타났다.

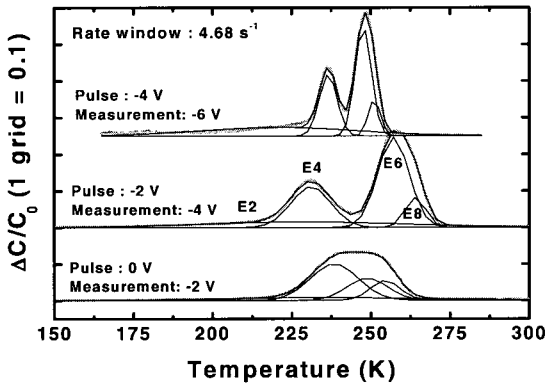

그림 4. 측정전압 및 펄스전압을 변화에 따른 DLTS 신호모습.

한편, PL 신호나 DLTS신호의 크기가 한 쪽이 크다는 것은 한 쪽 층의 양자점이 더 많은 운반자를 포획할 수 있음을 의미하는데, 이와 같은 현상이 가능하려면 한 쪽 양자점이 기저준위(ground state) 이상으로 많은 여기준위(excited state)들을 가져야만 한다. 즉 하나 이상의 에너지 준위가 분포하게 되고 두개 이상의 에너지 준위로부터 검출되는 신호가 겹쳐 나타나게 되어 대칭이 될 수 없다. 그러나 두개 이상이라는 것만 알 수 있을 뿐 그 이상의 정보를 얻기에는 일반적인 DLTS 측정만으로는 어렵다. 그러나 여러 개의 신호가 겹쳐 있다고 가정하고 multi-peak fitting을 통해서 신호를 분리하여 온도가 낮은 쪽 신호부터 E2, E4, E6, E8 의 네 개 신호들에 대해 분석하여 보았다. 이렇게 분석된 결과는 표1에 자세하게 나타내었는데, E2 신호의 경우는 신호가 매우 퍼져있고 그 크기 또한 매우 작으므로 multi-peak fitting 정도의 기법으로는 정확한 에너지 준위 분석이 힘들다. 그러나 E4, E6, E8의 경우는 일정이상의 크기를 가지고 신호의 모양 자체도 일반적인 DLTS 신호와 같아 분석이 가능하였다. 이를 바탕으로 인가된 측정전압 조건에 따른 DLTS 결과를 분석해 보면 역방향 측정전압(measurement bias)이 약할 때는 두 그룹의 신호가 근접해 있다가 역방향 측정전압이 증가하면서 떨어지는 모습을 보여주는데, 이 결과는 다른 연구그룹의 결과와 일치한다 [12]. 특히 E4의 경우 거의 변화가 없음에 비해 E6와 E8의 경우 최저와 최고의 차이가 각각 60 meV 정도씩 차이나 나는 것을 보여준다. 여기서 E4와 E8은 작은 양자점 층과 큰 양자점 층에 존재하는 양자점의 기저준위가 가장 큰 원천이라 생각되고, E6의 경우는 큰 양자점의 첫 번째 혹은 그 이상의 여기준위가 원천이라 예상하고 있으나 이를 증명하기 위해선 좀 더 많은 연구가 필요하다.

두 그룹의 신호를 각각의 양자점에서 나오는 신호라고 생각하고 앞서 나온 DLTS 결과를 에너지 띠 구조로 놓고 설명해 보면, 그림 5에 도시한 바와 같이 약한 역방향 전압 상태에서는 띠의 기울기가 작아서 인접된 양자점의 두 에너지 준위가 결합되어 있다가 역방향 전압이 증가하면 띠의 기울기가 커짐에 따라 인접되었던 두 에너지 준위가 분리되는 것으로 설명될 수 있다.

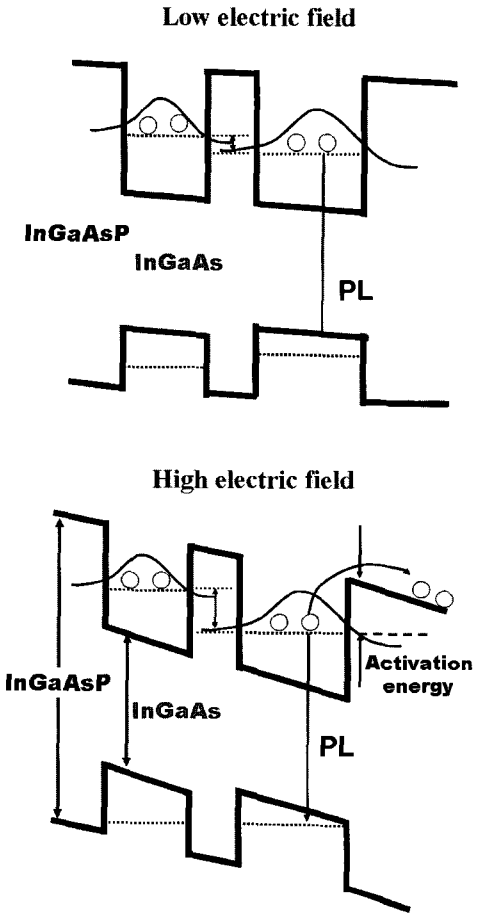

그림 5. 인가된 전기장의 변화에 따른 양자점 분자구조의 에너지 띠 구조도. 실제 에너지 띠 구조도는 이보다 복잡하나 간략하게 개념적으로만 표시하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 유기금속화학기상증착법으로 성장된 InGaAs/InGaAsP/InP 양자점 분자구조에서 두 양자점 층간 간격이 10 nm인 구조의 전기 광학적 물성측정을 통하여 이 구조에서의 양자점 결합특성을 조사하였다. PL 및 DLTS 측정을 통하여 두 양자점이 결합된 분자구조에서의 에너지 준위의 위치 및 에너지준위의 분포량을 확인한 결과, 큰 양자점은 작은 양자점과 비교하여 장벽 물질의 전도대역 가장자리로부터 먼 쪽에 에너지 준위가 형성되어 있음을 보였으며, 양쪽 양자점에 존재하는 운반자의 농도 분포로부터 큰 쪽 양자점에는 최소한 두개 이상의 에너지 준위에 운반자를 포획시킬 수 있음이 확인되었다. 또한, 인가된 전압의 변화에 대하여 약한 전기장 하에서는 양자점 분자구조의 각각 양자점의 에너지 준위가 서로 밀접하게 연관되어 있다가 전기장이 증가하면서 이들 두 에너지 준위가 확연히 분리되는 모습을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-015-C00117).

참 고 문 헌

[1] P.-F. Braun, X. Marie, L. Lombez, B. Urbaszek, T. Amand, P. Renucci, V. K. Kalevich, K. V. Kavokin, O. Krebs, P. Voisin, and Y. Masumoto, Phys. Rev. Lett. **94**, 16601 (2005).

[2] M. Hayne, R. Provoost, M. K. Zundel, Y. Manz, K. Eberl, and V. V. Moshchalkov, Physica E **6**, 436 (2000).

[3] K. E. Meissner, C. Holton, and W. Spillman, Physica E **26**, 377 (2005).

[4] L. Jacak, P. Hawrylak, and A. W js, *Quantum Dots* (Springer-Verlag, New York, 1997) p. 1.

[5] L. L. Chang, L. Esaki, and R. Tsu, Appl. Phys. Lett. **24**, 593 (1974).

[6] R. Dingle, W. Wiemann, and C. H. Henry, Phys. Rev. Lett. **34**, 1327 (1975).

[7] H. D. Kim, W. G. Jeong, J. H. Lee, J. S. Yim, D. Lee, R. Stevenson, P. D. Dapkus, J. W. Jang, and S. H. Pyun, Appl. Phys. Lett **87**, 083110 (2005).

[8] M. K. Zundel, N. Y. Jin-Phillipp, F. Phillipp, K. Eberl, T. Riedl, E. Fehrenbacher, and A. Hangleiter, Appl. Phys. Lett. **73**, 1784 (1998).

[9] Y. Zheng, T. L , C. Zhang, and W. Su, Physica E **24**, 290 (2004).

[10] R. H. Blick, R. J. Haug, K. von Klitzing, and K. Eberl, Surf. Sci. **361/362**, 595 (1996).

[11] G. Bacher, H. Sch mig, M. Scheibner, A. Forchel, A. A. Maksimov, A. V. Chernenko, P. S. Dorozhkin, V. D. Kulakovskii, T. Kennedy, and T. L. Reinecke, Physica E **26**, 37 (2005).

[12] G. Ortner, M. Bayer, A. Kress, A. Forchel, Y. B. Lyanda-Geller, and T. L. Reinecke, Physica E **21**, 171 (2004).

[13] J. W. Jang, S. H. Pyun, S. H. Lee, I. C. Lee, W. G. Jeong, R. Stevenson, P. D. Dapkus, N. J. Kim, M. S. Hwang, and D. Lee, Appl. Phys. Lett. **85**, 3675 (2004).

[14] S. M. Sze, *Semiconductor Devices – Physics and Technology*, 2nd ed (John Wiley & Sons, New York, 2002), p. 101.

[15] D. V. Lang, J. Appl. Phys. **45**, 3023 (1974).

[16] P. Blood and J. W. Orton, *The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States* (Academic Press, New York, 1992), p. 336.

[17] E. K. Kim, J. S. Kim, H. Hwang, K. Park, E. Yoon, J. H. Kim, I.-W. Park, and Y. J. Park, Jpn. J. Appl. Phys **43**, 3825 (2004).

<<Research Paper-Focussed Topic>> Journal of the Korean Vacuum Society Vol.15 No.2, March 2006, pp.186~193

Study on InGaAs/InGaAsP/InP Quantum-dot Molecules for Quantum Interference devices

Jin Soak Kim[1], Eun Kyu Kim[1*], and Weon G. Jeong[2]

[1]*Department of Physics and Quantum-Function Spinics Laboratory, Hanyang University, Seoul 133-791*
[2]*Department of Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746*

(Received January 20, 2006)

In this study, we analyzed the electrical and optical properties of metalorganic chemical vapor deposition grown InGaAs/InGaAsP/InP quantum dot(QD) molecules by using photoluminescence and deep-level transient spectroscopy. From these resulte, the energy levels of the large QDs are located at deeper region from the conduction band edge of the barrier than that of the small QDs. The large QDs seem to have the energy states more than two, and these energy levels of the QD molecules are located at 0.35, 0.42, and 0.45 eV from conduction band edge under -4 V reverse bias conditions. The energy levels are closely coupled under low reverse bias, and then decoupled as the bias voltage is increased.

Keywords : Quantum dot molecules, Quantum interference devices, InGaAs/InGaAsP/InP

* [E-mail] ek-kim@hanyang.ac.kr