

# Thema | InAs/GaAs 자발형성 양자점을 기반으로 하는 나노광소자

최원준 책임연구원  
(KIST 나노소자연구센터)

## 1. 서론

나노기술은 물질이 Bulk 상태에서 나노미터( $10^{-9}$  m) 크기로 작아지는 경우에 발생하는 양자역학적 현상을 적극 이용하는 기술이다. 이러한 기술은 양자역학에서 이론적으로 논의되던 물질을 제조하고 이의 특성을 적극 이용함으로써 기존의 Bulk 기반의 소자의 특성을 획기적으로 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 양자암호통신, 양자연산 등의 신기능을 구현할 수 있는 기술이다. 나노기술의 실현을 위한 접근 방법으로는 잘 발달된 나노공정기술을 바탕으로 나노미터 크기의 구조체를 제작함으로써 기존의 기술을 극복하는 Top-down 방식과 자발형성 방식에 의해 형성되는 나노구조체의 특성을 조절함으로써 양자역학적 특성을 조절하고 이를 이용하여 신기능의 소자를 제작하는 Bottom-up 방식으로 나눌 수 있다.

나노포토닉스는 나노기술을 이용하여 기존 광소자의 특성을 획기적으로 향상시키거나 혹은 광자의 특성을 조절하는 기술이다. 나노포토닉스의 가장 중요한 기술 중 하나는 광자 생성을 위한 활성층으로 자발형성 양자점을 사용하는 것이다. 본고에서는 화합물반도체 양자점인 InAs 자발형성 양자점을 활성층으로 사용하는 나노포토닉스 소자들 예컨대 양자점 발광소자 양자점 원적외선 수광소자에 대한 현재의 기술발전과 양자점을 기반으로 하는 양자정보처리기술에 대한 소개를 하도록 한다.

## 2. 자발형성 화합물반도체 InAs 양자점의 성장 및 특성

화합물 반도체의 영차원계(혹은 양자점 구조)를 이용한 소자화 기술은 90년대 중반 자발형성 양자점 성장기술이 성숙되면서[1,2] 급속하게 연구가 전개되고 있으며 InGaAs/GaAs, InGaAs/InP 등과 같은 화합물반도체의 재료를 이용하는 양자점에 관한 연구가 주를 이루고 있다. InAs를 GaAs 기판 상에 성장시키기 위해 In과 As를 동시에 도포시키는 경우 일정한 두께의 InAs가 성장한 후에는 이들 사이의 격자 부정합에 의해 표면에너지의 감소를 위해 InAs가 3차원적으로 뭉치는 현상이 발생한다. 이러한 방식으로 성장된 양자점을 일반적으로 SK 방식의 양자점이라 하며 화

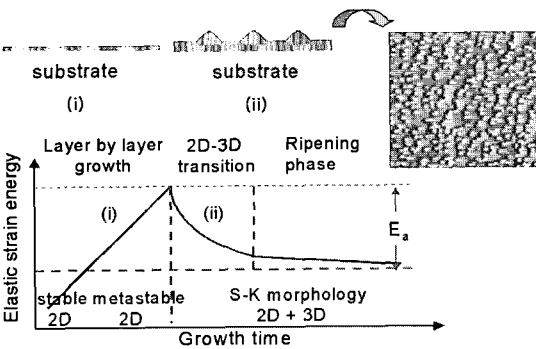


그림 1. S-K 성장방식에 의한 자발형성장자점의 형성 원리 개략도 및 InAs/GaAs 양자점의 AFM 이미지.

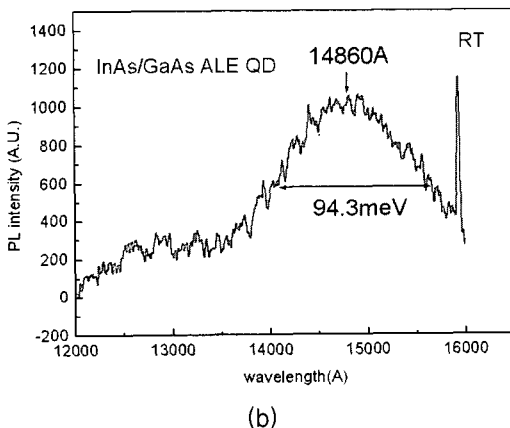
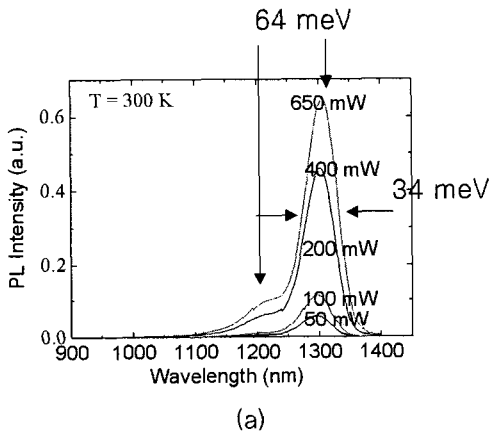


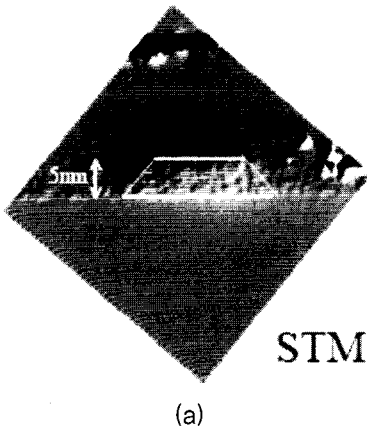
그림 2. ALE 방식으로 성장된 InAs/GaAs 양자점의 발광특성 (a) InAs dot-in-a well 구조 (b) InAs 양자점.

합물반도체 양자점기반 광소자에 매우 광범위하게 사용된다. 그림 1은 이러한 방식으로 성장한 양자점의 성장원리 및 성장된 InAs 양자점의 AFM 이미지를 보여준다. 이러한 방식이외에 InAs 성장 시 In과 As를 순차적으로 도포시켜 양자점을 성장하는 방식이 있으며 이러한 방식의 양자점을 ALE 양자점이라 한다. ALE 양자점은 SK 양자점에 비해 크기, 성분의 조절이 용이하며 크기 균일도가 우수한 장점뿐만 아니라 2차원 효과를 발생하는 Wetting Layer의 두께가 작은 장점이 있다[3]. 이러한 InAs/GaAs 양자점은 기존에 InGaAs/GaAs 양자우물을 사용하는 경우 얻기 어려웠던 1300 nm 파장대 및 1500 nm 파장대의 발광을 GaAs 기판 상에서 실현시킬 수 있는 장점으로 인해 기존의 InP 기판을 사용한 발광소자를 대체할 수 있는 매질로 평가되고 있다. 그림 2는 KIST 나노소자연구센터에서 성장한 InAs/GaAs 양자점의 PL을 측정된 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 GaAs 기판 상에서 1300 nm 및 1500 nm 파장대의 발광을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

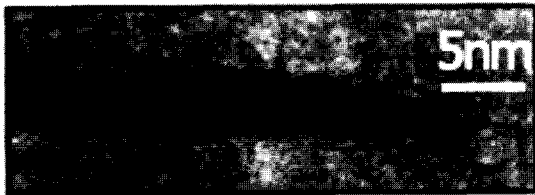
그림 3은 매립되어 있는 InAs/GaAs 단일 양자점의 STM 이미지와 TEM 이미지를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 양자점의 크기는 대략  $20 \times 5 \text{ nm}^2$ 의 크기를 갖으며 대략 10000개 이상의 원자로 구성되어 있다. 이러한 양자점의 DOS (Density of State)는 그림 4에 보는 바와 같이 Delta 함수와 같은 형태를 갖는다. 이러한 양자점의 특이한 DOS는 원자와 매우 유사하여 양자점의 기저상태에 두 개의 운반자만을 허용함으로써 양자점을 인공원자라 불리게 한다.

양자점이 갖는 이러한 특성은 기존 양자광학에서 단일원자를 매개로 하는 여러 가지 실험을 조절가능한 반도체 양자점을 이용한 실험으로 대체하게 하는 가능성을 제시하였으며, 최근 반도체 양자점을 이용한 많은 양자광학적 실험들이 수행되고 있다. 이러한 시도중 괄목할 만한 응용이 반도체 양자점을 이용한 단일광자 발생기이며, 단일광자발생기는 양자 암호통신을 위해 필수적이다.

양자점은 양자점 발광소자 혹은 수광소자와 같은 대규모의 양자점군을 필요로 하는 응용과 단일 양자점의 특성을 적극적으로 이용하려는 단일 양자점 기



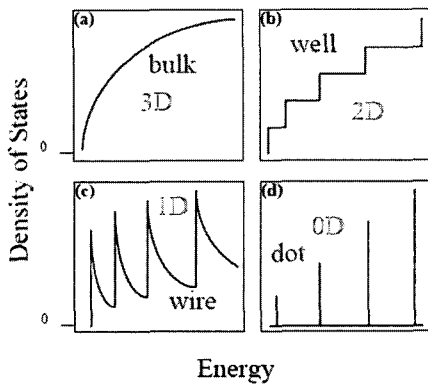
(a)



TEM

(b)

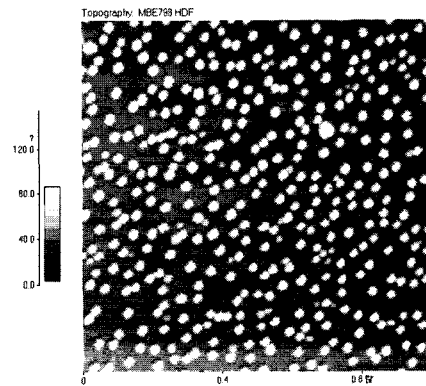
그림 3. InAs/GaAs 양자점의 STM 및 TEM 이미지.



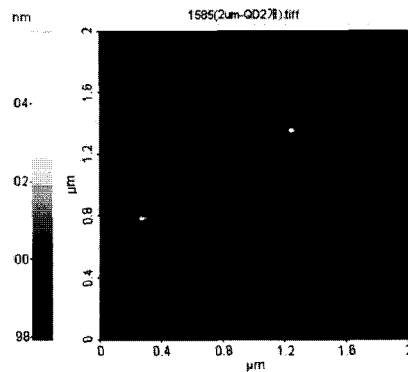
Energy

그림 4. 물질의 여러 상태에 따른 운반자의 DOS.

반의 양자정보처리에의 응용으로 나눌 수 있다. 일반적으로 GaAs 기판 상에 성장되는 In(Ga)As 양자점은 그 성장방식에 기인하는 특성으로 인해 크기의 불균일성을 갖는다. 이러한 양자점군의 크기 불균일성은 넓은 발광 스펙트럼을 유기하게 되므로 반도체 광증폭기나 혹은 외부공진기형의 파장가변레이저의 활성층으로 사용될 때에는 매우 유용하지만, 이득이 단일파장에 집중될 것이 요구되는 레이저 다이오드의 활성층으로 사용되기 위해서는 그 불균일성이 극복될 것이 요구된다. 양자점의 크기 불균일성의 조절기술 뿐만 아니라 양자점의 양자정보처리에의 응용을 위해서는  $1 \mu\text{m}^2$ 이 면적에 양자점을 1~2개를 성장하는 기술을 확보해야 한다. 따라서 양자점



(a)



(b)

그림 5. KIST 나노소자 연구센터에서 성장한 InAs 양자점의 AFM 이미지 (a) 양자점 LD용 ( $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ) (b) 양자정보처리용 ( $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ )

의 성장 및 조절기술은 나노포토닉스 및 양자점을 근간으로 하는 양자정보처리의 핵심기술이라 할 것이다. 그림 5는 KIST에서 성장한 양자점 LD용 양자점과 양자정보처리용으로 성장된 저밀도 양자점의 AFM 이미지를 보여준다.

### 3. InAs/GaAs 자발형성 양자점의 나노포토닉스 소자 응용

#### 3.1 InAs/GaAs 양자점 발광소자

양자점이 갖는 Delta 함수형의 DOS 특징으로 인해 양자점 활성층으로 주입된 운반자는 매우 좁은 영역의 에너지내에 높은 DOS를 가질 것이 기대된다. 이러한 특징으로 인해 Cavity 내의 양자점 활성층에서 천이하는 운반자는 매우 큰 물질이득을 제공한다. 이러한 특성은 양자점을 활성층으로 하는 양자점 LD (Laser Diode)의 발진개시 전류 밀도를 줄여주게 된다. 현재 발표되는 양자점 LD의 문턱 전류 밀도는  $16 \text{ A/cm}^2$  정도로 양자우물 LD의  $60 \text{ A/cm}^2$  보다 매우 작은 값을 갖는다.

양자점 LD의 경우 양자우물 LD와는 달리 공간적으로 주입된 운반자들이 양자점에 3차원적으로 구속됨으로써 온도의 영향을 작게 받게 되어 좋은 온도특성을 보이게 된다. 이론적으로는 양자점 LD가 기저상태에서 발진하고 있고, 양자점의 여러 상태 중 기저상태와 여기상태와의 에너지 차가 커서 온도의 증가에 따른 운반자의 재분포가 거의 없는 경우, 온도의 증가에 따라 발진개시 전류밀도는 변하지 않아 특성온도는 무한대 값을 갖는다. 하지만 현실적으로는 양자점을 구성하는 장벽층이 낮아 기저상태와 여기상태와의 에너지차가 작기 때문에 특성온도는 유한한 값을 갖게 된다. 최근 Michigan대의 Bhattacharya 그룹의 발표에 의하면 양자점 LD의 특성온도는 상온 근처에서  $273 \text{ K}$  이다[4].

양자점 LD에서는 주입된 운반자가 공간적으로 양자점에 국재화 되고 이로 인한 굴절률 변화가 매우 적기 때문에, Linewidth Enhancement Factor가 매우 작아지기 때문에 양자점 LD는 매우 적은 Chirping하에서 고속 동작이 가능하다. 이는 기존 양자우물을 기반으로 하는 광소자가 갖는 고속 동작

시 큰 Chirping을 갖는 단점을 극복할 수 있는 장점이다. 최근 Michigan대의 Bhattacharya 그룹에서는 상온에서 측정할 수 없는 정도로 작은 Chirping을 갖는  $15 \text{ GHz}$ 의 직접변조 대역폭의 양자점 LD를 보고한 바가 있다[4].

낮은 Auger 효과와 운반자 구속효과를 갖는 양자점이 갖는 높은 온도 안정성 때문에 양자점을 이용한 고효율 LD는 양자우물 LD에 비해 매우 좋은 특성들이 보고되고 있다. 최근에는 Bimberg 그룹에서 상온 연속동작시  $4 \text{ W}$ 의 출력에서  $95\%$ 의 양자효율과  $51\%$ 의 전력 변환효율을 갖는  $1.3 \mu\text{m}$ 대 고효율 LD를 발표하였다. 특히 이들은 단일모드로  $100 \text{ mW}$ 까지 Kink-free 동작이 가능함을 보고한 바도 있는데 이는 양자우물 LD에 비해 매우 놀라운 수준이다. 비록 현재의 양자점 성장기술이 갖는 낮은 온도에서의 양자점 성장에 기인한 Defect의 제거기술 개발과 공진기 거울면 근처에서 Carrier Localization에 기인한 공진기 거울면의 Heating과 그로 인한 거울면의 열화문제가 해결될 경우 현재의 출력보다 훨씬 큰 Stripe당  $100 \text{ W}$ 급의 고효율 LD의 제작이 가능하리라 기대되고 있다.

광통신에서  $1.28\text{-}1.32 \mu\text{m}$  파장대는  $2\text{-}10 \text{ km}$ 의 거리영역에서 Data 통신에 이용되는 중요한 파장대역이다. 양자우물을 활성층으로 사용하는 경우 이 파장대역을 위한 물질계는 InGaAsP/InP 혹은 InGaAlAs/InP 이다. InP는 GaAs에 비해 상대적으로 열전도도가 낮으므로 InP계 양자우물 LD의 안정된 동작을 위해서는 TEC (Thermo-Electric Cooler)를 이용한 온도안정화가 필수적이다. 따라서 InP 양자우물 LD는 실장비용의 증가에 의한 비용의 증가가 단점이다. 하지만 GaAs 기판상의 In(Ga)As 양자점은 상기 파장대역에서 좋은 발광특성을 보인다. GaAs 기판이 InP에 비해 상대적으로 열전도도가 좋은 특성이 있을 뿐만 아니라 앞에서 설명한 바와 같이 양자점의 특성이 열에 강한 특성을 지니고 있어  $1.3 \mu\text{m}$  파장대역에서 Cooler-less LD 제작을 위한 적합한 활성층이라 할 수 있다.

GaAs 기판 상에서의 In(Ga)As 양자점 LD의 장파장 발진은 양자점의 기저 상태 발진을 통해 이루어질 수 있다.  $1.3 \mu\text{m}$  파장대역 In(Ga)As 양자점의 상

온 PL Spectrum을 얻을 수는 있지만[5,6], 양자우물과는 달리 양자점의 기저상태에서의 이득이 여기상태보다는 작고 Modal Gain이 작은 이유 때문에 기저상태 발진을 얻기가 어렵다. 이러한 이유 때문에 기저상태 발진은 양자점을 적층하여 기저상태 이득 포화를 상쇄한 상태에서 Cavity 길이가 길게 하거나 혹은 LD의 양 단면에 고반사막을 증착함으로써 실현되었다[7,8]. 특히 Wurzburg 그룹은 Metal Grating을 사용하여 1.3  $\mu\text{m}$ 대의 광궤환을 극대화시킴으로써 1.3  $\mu\text{m}$  양자점 LD를 발진시킨 바 있다[9].

양자점 LD의 국내 연구는 KIST 나노소자연구센터, ETRI, 성균관대에서 활발히 연구되고 있으며, ETRI의 경우 MBE를 이용하여 InAs/InP 양자점을 성장하고 이를 이용하여 1.5  $\mu\text{m}$ 대의 양자점 DFB-LD를 개발한 바 있으며, 성균관대의 정원국 교수 연구팀의 경우 MOCVD를 사용하여 1.5  $\mu\text{m}$ 대의 InAs/InP 양자점 LD의 상온발진에 성공한 바 있다. KIST 나노소자연구센터의 경우 InAs/GaAs 양자점 성장 및 이를 이용한 LD 개발에 성공한바 있다. 그림 6, 7, 8은 각각 3층의 InAs DWELL 구조를 채용한 InAs/GaAs 양자점 LD의 구조, LI 곡선 및 발진 스펙트럼을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 상온에서 양자점 LD의 발진파장은 1.31  $\mu\text{m}$ 으로 발진파

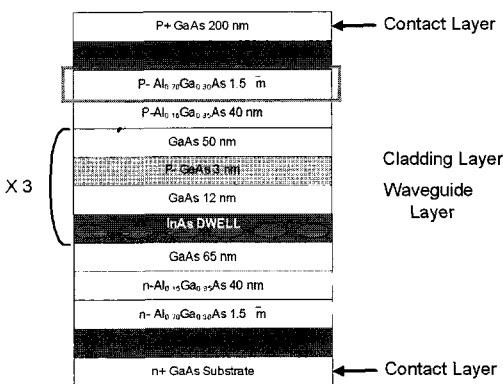


그림 6. KIST에서 개발된 InAs/GaAs 양자점 LD의 구조도. 70 % AlGaAs Cladding Layer를 채용하고 3층의 InAs DWELL 구조를 활성층으로 사용하였으며, 온도특성의 향상을 위해 3 nm 두께의 p형 변조도핑이 중간층에 도입되었다.

장면에서는 세계 최고의 수준을 보여주고 있으며, 발진개시 전류 밀도는 89 A/cm<sup>2</sup>, 특성온도는 113 K로 세계적인 수준임을 보여준다. 향후 이러한 소자는 단거리 광통신에 채용될 수 있다.

양자점은 운반자의 3차원적 구속 효과뿐만 아니라 크기의 불균일성에 기인하는 발광파장의 Inhomogeneous Broadening 특성과 매우 빠른 이득회복 특성을 갖는다. 이러한 특성으로 인해 양자점을 활성층으로하는 광증폭기는 채널간의 누설이 적고, 자동 이득고정기능을 가질 뿐만 아니라 다채널 동시 신호처리가 가능하다. 특히 빠른 이득회복특성으로

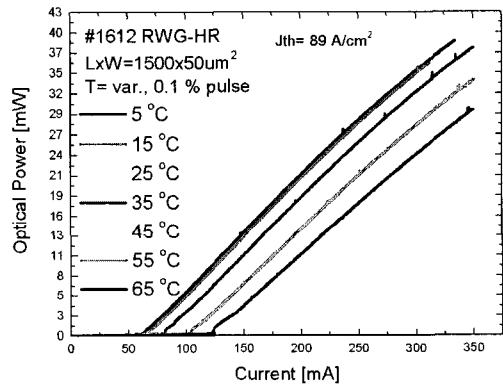


그림 7. 제작된 InAs/GaAs 양자점 LD의 LI 곡선.

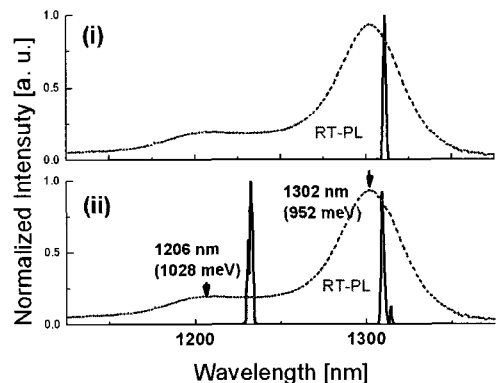


그림 8. InAs/GaAs 양자점 LD의 PL 스펙트럼 및 발진 스펙트럼. (i)는 기저상태의 발진시의 스펙트럼을 보여주며 (ii)는 전류주입이 과도하였을 경우 생성되는 기저상태 및 여기상태 동시 발진을 보여준다.

인해 현재 40 Gbps급의 양자점 광증폭기가 보고되고 있는 실정이다. 양자점 광증폭기는 1.5  $\mu\text{m}$  파장대의 장거리 통신용으로 사용되어지며, 이러한 파장대를 위해서는 InP 기판 상에 성장한 InAs 양자점이 적합하다. 현재 전 세계적으로 일본의 후지쯔에서 상용화를 시도하고 있으며 국내에는 성균관대/충남대의 연합팀이 매우 좋은 결과를 보여주고 있다.

양자점이 갖는 불균일성은 광대역 증폭을 위해 매우 좋은 매질로 광증폭기를 위한 좋은 매질이기도 하지만 파장대역폭이 넓은 광원이 요구되는 OCT (Optical coherence Tomography), Spectrum Slicing을 이용한 WDM-PON 광원, 광섬유 자이로스코프 등에 사용되는 Superluminescent Diodes (SLDs)를 위한 좋은 매질이기도 하다. SLD를 위한 기존의 접근법은 우물의 두께가 조절된 양자우물을 적층하는 Chipped QW 방법을 사용하였지만 양자점의 경우 크기의 불균일성을 가지고 있을 뿐만 아니라 기저상태와 여기상태의 에너지차에 의해 발광스펙트럼이 매우 넓게 나타난다. 이러한 특성은 광대역 SLD를 제작하기 매우 좋은 특성이 된다. 그림 9는 KIST 나노소자연구센터에서 제작한 양자점 SLDs의 개략도를 나타낸 것이다.

그림 9에서 전극을 중심축으로부터 7도 기울인 것은 Fabry-Perot 모드 형성을 억제시키기 위한 것이다. 사용된 양자점은 ALE (Atomic Layer Epitaxy) 기법으로 성장한 InGaAs 양자점이고, n 클래딩층을

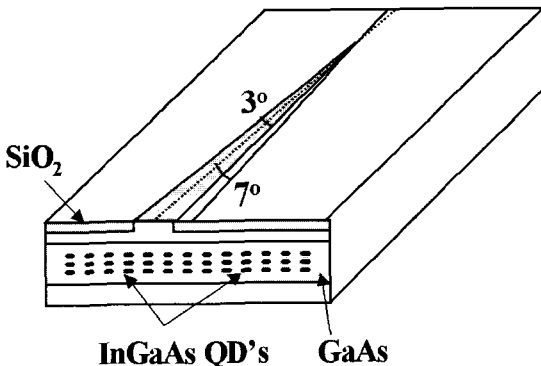


그림 9. InGaAs 양자점 SLD의 개략도.

제외한 모든 층은 양자점 성장 온도와 동일한 510  $^{\circ}\text{C}$ 에서 성장하였다. 양자점은 총 3층을 적층하였고, 각 양자점층 사이는 40 nm 두께의 GaAs로 분리시켰었다. 그림 10은 사용된 양자점의 TEM 이미지를 보여준다.

제작된 양자점 SLD는 최대 0.8 W의 출력을 갖으며 그림 11에서 보는 바와 같이 스펙트럼의 밴드폭이 93 nm가 되는 좋은 특성을 보였다[10].

### 3.2 InAs/GaAs 양자점 원적외선 수광소자

원적외선 수광소자는 열상을 얻기 위해 사용되는 소자로 민수용, 산업용, 의료용, 보안용, 인공위성 탑재체 및 군사용으로 매우 중요한 소자이다. 특히

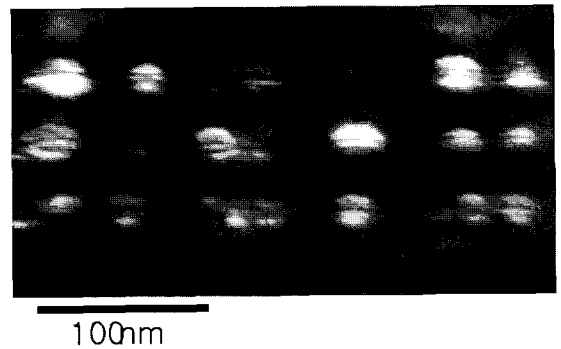


그림 10. 양자점 SLD에 상용된 InGaAs 양자점의 TEM 이미지.

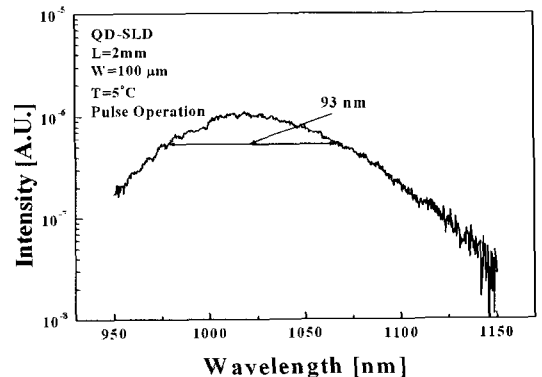


그림 11. 3 stacked InGaAs 양자점 SLDs의 스펙트럼 특성 곡선.

인공위성 및 군사용으로 사용되는 고성능 원적외선 수광소자는 전락물자 통제대상으로 선진국에서 그 기술유출을 철저히 통제하고 있는 기술이다. 그림 12는 용광로의 온도구배를 보여주는 열상으로 원적외선 열상소자가 용광로에서 열유출을 살핌으로써 용광로의 보수에 사용될 수 있음을 보여준다. 또한 그림 13은 인공위성에서 촬영된 2005년 미국 남부를 휩쓸었던 허리케인 Wilma의 파장 10.2 - 11.2  $\mu\text{m}$ 대의 원적외선 영상이다. 이러한 영상은 야간에도 촬영이 필수적이며 매우 빠른 응답속도의 원적외선 수광소자가 필수적이다.

현재 고성능 원적외선 수광소자의 경우 MCT (HgCdTe)를 사용하는 것이 일반적이다. 하지만 MCT의 경우 그 성질이 무르며, 균일한 소자 Array

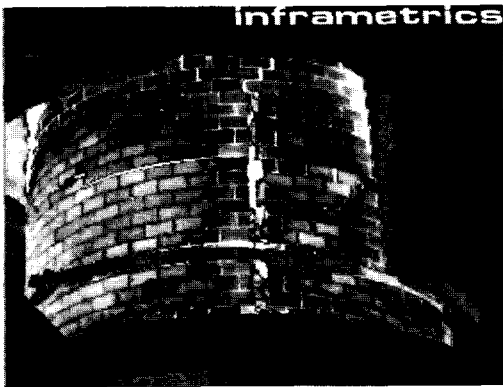


그림 12. 용광로의 열상.

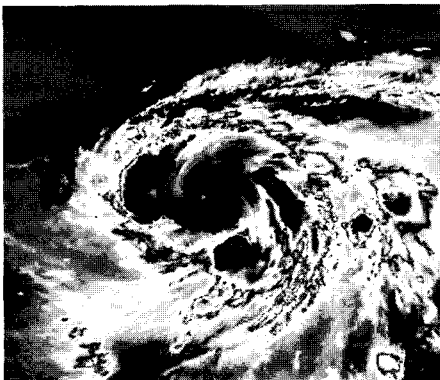


그림 13. 허리케인 Wilma의 원적외선 영상.

제작에 난점이 있으며 매우 고가이다. 하지만 발달된 화합물반도체 소자기술을 활용하는 경우 균일한 2-D Array 제작이 가능하며 고속 동작 소자인 GaAs 계 HEMT (High Electron Mobility Transistor)와 집적이 가능한 장점이 있어 최근 양자우물 및 양자점을 원적외선 흡수층으로 사용하는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

양자구조를 원적외선 수광소자의 흡수층으로 사용하는 수광소자의 동작원리는 그림 14에 나타나 있는 바와 같이 양자구조내 일정 에너지 상태에 주입되어 있는 운반자의 원적외선에 의한 밴드간 천이이다. 양자점의 경우 운반자의 3차원 구속효과에 의해 기존 양자우물에 비해 온도 특성이 좋아 상온 동작이 가능하며, 구형의 형상에 의한 적은 편광의존성을 갖고, 적은 암전류를 가질 뿐만 아니라 작은 포논 산란에 기인하는 매우 큰 광전도 이득을 제공한다.

그림 15는 미국 New Mexico 대학 연구진이 개발한 320x256 InAs/GaAs 양자점 원적외선 수광소자 Array를 이용하여 80 K에서 찍은 열상이다[11]. 그림에서 보는 바와 같이 열발산을 억제하는 안정이 인체와는 매우 다르게 검게 나타나 있다.

KIST 나노소자연구센터의 경우 그림 16과 같이 New Mexico 대학과 비슷한 구조의 양자점 원적외선 수광소자를 성장하고 850  $^{\circ}\text{C}$ 에서 기판을 열처리한 후 소자를 제작하였다. 그림 16에서 보는 바와 같

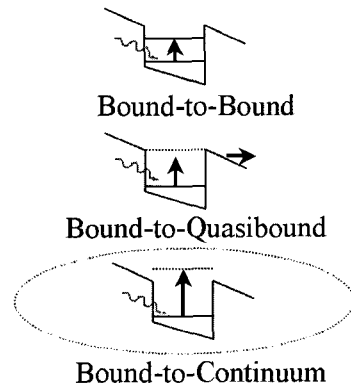


그림 14. 양자구조를 사용한 원적외선 수광소자의 동작 원리.

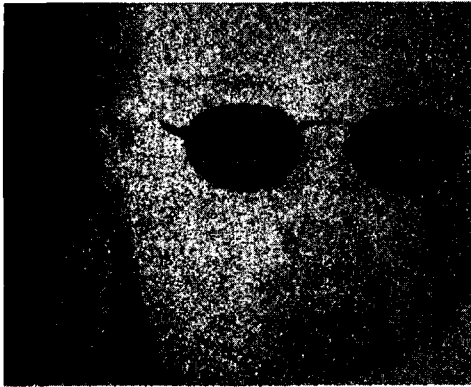


그림 15. New Mexico 대학의 320 x 256 양자점 원적외선 Array를 이용하여 촬영한 열상.

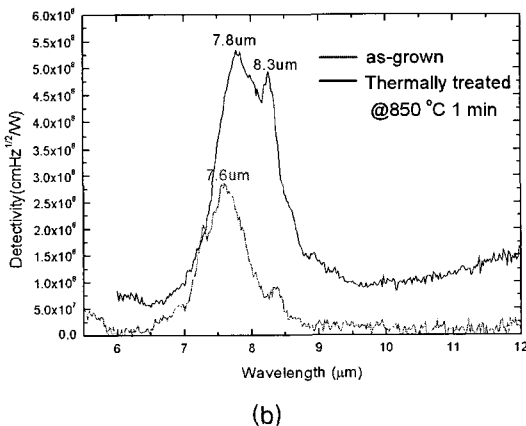
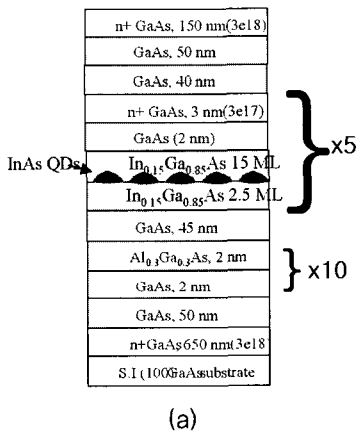


그림 16. KIST 나노소자연구센터에서 성장한 양자점 원적외선 수광소자의 구조 (a) 및 열처리 전후의 Detectivity (b).

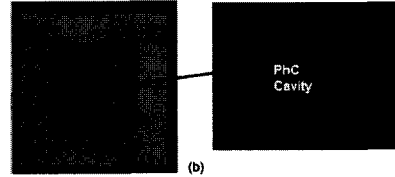
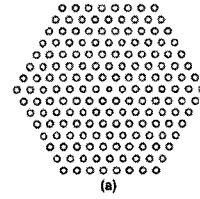


그림 17. 포토닉크리스탈을 적용한 양자점 원적외선 수광소자 (a) 포토닉크리스탈의 설계 예 (b) 제작된 포토닉크리스탈 양자점 원적외선 수광소자의 예.

이 열처리 후 수광소자의 피크 응답파장은 장파장화되고 Detectivity는 2배 이상 커진 것을 알 수 있다. 이는 열처리를 통하여 광전류생성을 위한 양자점 구조의 터널링장벽이 낮아졌기 때문으로 이해되며, 양자점구조의 성장 시 터널링 장벽의 조절을 통하여 Detectivity 및 Sensitivity를 증가시킬 수 있음을 보여주는 것이다.

최근 New Mexico 대학의 경우 [12]양자점 원적외선 수광소자에 그림 17과 같은 포토닉크리스탈을 도입하여 산란효과를 감소시킴으로써 원적외선 수광소자의 특성을 10배 이상 크게 향상시키기도 하였다. 이러한 결과는 Top-down 방식의 나노공정 기술을 이용하는 포토닉크리스탈기술과 Bottom-up 방식의 나노기술인 양자점 기술의 결합을 통하여 고성능의 나노포토닉 소자의 제작이 가능성을 보인 한 예이다.

#### 4. InAs/GaAs 자발형성 양자점의 양자 정보처리에의 응용

##### 4.1 단광자 발생기

양자정보를 암호키로 사용하는 양자암호전송의 경우 침입자가 양자암호를 중간에 도청하는 경우 전체의 양자상태가 깨지기 때문에 수신자가 도청당하



는 것으로 즉시 알 수 있어 원천적으로 도청이 불가능한 통신 방법이다. 이때 양자정보의 생성을 위해서는 순수한 양자상태가 필요하며 단일 광자는 잘 알려진 순수한 양자로 실용적인 양자암호 전송시스템의 개발을 위해서 실용적인 단광자 발생기 개발이 필수적이다.

인공원자라 불리는 양자점의 내부에서 운반자의 상태밀도는 Delta 함수와 같은 형태를 지니며 전도대 및 가전도대의 기저상태에 스핀이 Up, Down을 갖는 두 개의 전자 및 정공을 허용한다. 그림 18은 InGaAs/GaAs 양자점의 전도대 및 가전도대의 상태 및 각 상태에서 허용하는 운반자의 개수를 보여

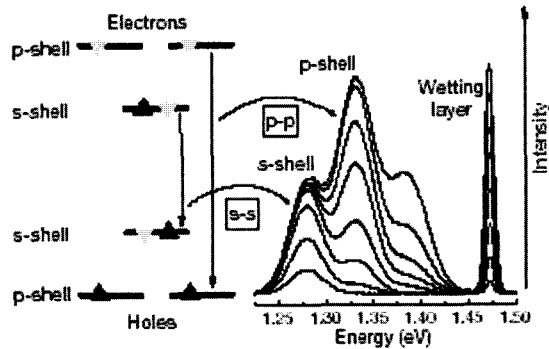


그림 18. InGaAs/GaAs 양자점의 전도대 및 가전도대의 에너지 배치도 및 이에 관련된 방사 스펙트럼[13].

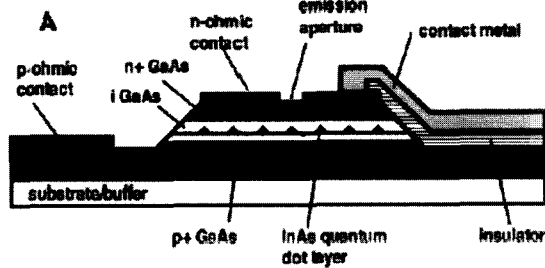
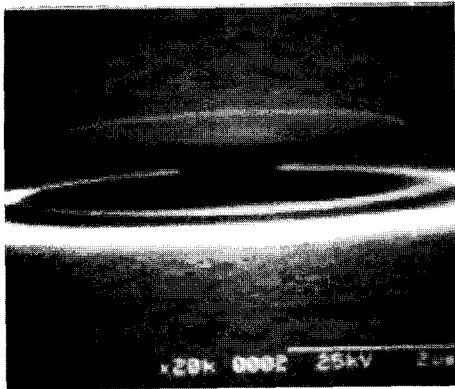


그림 19. 전류 구동형 단광자 발생기[14].

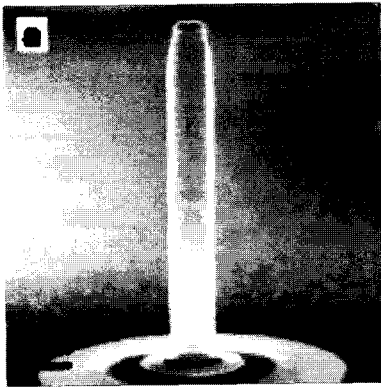
준다. 이때 전도대 및 가전도대의 s-shell 및 p-shell에 존재하는 전자 및 정공의 결합에 의해 방사 스펙트럼이 형성된다. 이때의 전자-정공 결합은 Selection Rule에 따른다. 따라서 s-shell에 존재하는 전자와 정공의 결합에 의해 하나의 광자가 형성된 후 비어 있는 s-shell을 채워야 다음의 광자가 발생될 수 있다. 이러한 원리로 단일 양자점은 단일 광자를 생성할 수 있게 된다. 이러한 양자점의 원자와 같은 특성으로 인해 양자점은 단일 광자 생성의 매우 중요한 매질로 이용된다. 이에 반해 양자우물의 경우, 전도대 및 가전도대의 기저상태에 매우 많은 전자 및 정공이 존재하므로 동시에 매우 많은 전자-정공의 결합이 가능하고, 따라서 매우 특수한 조건의 Pumping이 없는 경우 단일 광자 생성에 매우 어려운 것으로 인식된다.

비록 원리적으로 단일 광자는 레이저빔을 극단적으로 감쇄함으로써 얻어질 수 있지만 이러한 경우 시간적으로 단일 광자 펄스간의 시간 간격을 조절할 수 없는 단점이 있다. 따라서 실제로 유용한 단일 광자 펄스의 생성은 양자점의 s-shell에 존재하는 운반자의 결합에 의존할 수밖에 없다. 그림 19는 전류주입에 의해 동작하는 단광자 발생기로 p-i-n 구조의 i층에 삽입된 양자점에 주입되는 전자-정공쌍에 의해 발생하는 단광자를 n형 전극에 위치하는 매우 작은 구멍을 통해 포집하는 구조로 되어 있다.

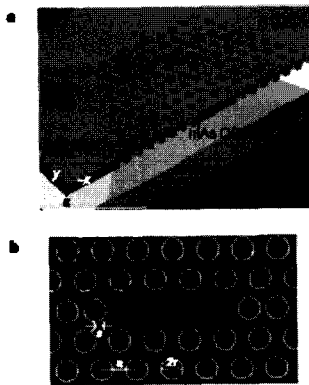
일반적으로 양자점에서의 운반자 수명은 수 ns 정도로 매우 길고 자발 방출율이 매우 작다. 이러한 양자점의 특성은 빠른 단광자 펄스 생성에 제한 요소가 된다. 하지만 양자점이 Q-factor가 매우 큰 Cavity 안에 갇히는 경우 광자의 자발 방출율이 매우 커지게 되고 Decay Rate가 작아질 뿐만 아니라 방향성 있는 광자를 생성할 수 있어 매우 빠른 펄스의 단광자가 가능할 뿐만 아니라 단광자의 포집율도 크게 된다. 이러한 이유 때문에 단광자 발생을 위한 단일 양자점을 매우 작은 크기의 Micro-cavity에 넣은 단광자 발생기에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다. Q-factor가 매우 큰 Micro-cavity를 이용하기 위해 많은 연구자들이 그림 20과 같은 Microdisk 형, VCSEL (Vertical Cavity Surface Eitting Laser) 혹은 포토닉 크리스탈형의 Micro-cavity를 이용한 단광자 발생기



(a)



(b)



(c)

그림 20. 여러 가지 형태의 Micro-cavity형 단광자 발생기 (a) Microdisk형[15] (b) VCSEL형[16] (c) 포토닉크리스탈형[17].

에 대한 연구를 수행하고 있다.

그림 20에서 보는 바와 같이 여러 가지 형태의 단광자 발생기의 발광영역은 대략  $1 \mu\text{m}^2$  크기를 갖는다. 일반적인 양자점 성장방법을 이용하는 경우 그림 5-(a)에 나타난 바와 같이  $1 \mu\text{m}^2$ 의 면적에 수백 개의 양자점이 형성된다. 따라서 이러한 양자점은 단광자 발생기에 적합하지 않은 양자점이라 할 수 있으며, 그림 5-(b)에 나타난 바와 같이  $1 \mu\text{m}^2$ 에 1개 정도의 양자점을 갖도록 양자점을 성장하는 기술의 개발이 필수적이라 할 수 있다. 현재 KIST 나노소자 연구센터에서는  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 에 2개 정도의 양자점을 성장하는 기술을 개발하였으며 향후 이를 이용한 단광자 발생기에 관한 연구가 진행 중이다.

#### 4.2 양자연산

디지털 컴퓨터에서 정보는 '0' 과 '1' 로 이루어진 고전적인 비트(Bit)의 조합으로 표현된다. 하지만 양자정보처리를 위한 양자비트 혹은 Qubit은 양자역학적으로(혹은 수학적으로) 서로 직교하는 상태인  $|0\rangle$ 과  $|1\rangle$ 의 선형 조합에 의해 표현된다. 이러한 Qubit은 그 선형성 때문에 병렬연산을 가능케 한다. 만약 N 개의 Qubit로 이루어진 양자연산기가 있는 경우  $2^N$  개 상태에 대한 대용량 병렬연산을 가능케 한다. 양자연산의 막강한 장점은 얽힘상태(Entanglement)에 의해 발휘된다. 얽힘상태는 두 개 이상의 서로 다른 Qubit들의 서로 다른 조합으로 이루어진 단일상태로 표현된다. 만약 Two-Qubit System의 경우 4개의 서로 구별 가능한 상태로 표현할 수 있어야 하며, 이러한 구별 가능한 4개의 상태는 얽힘상태를 이루는 Basis가 된다. 단일상태로의 얽힘상태는 얽힘상태를 구성하고 있는 각각의 Qubit의 상태가 외부에서 가해지는 물리적인 연산자의 도입에 의해 자동적으로 규정되는 특성이 있다. 이러한 얽힘상태를 이루는 Qubit들 간의 완벽한 상호관계에 기반한 얽힘상태는 병렬연산의 분기나 혹은 논리판정을 가능케 한다. 또한 얽힘상태는 양자암호통신에 사용되어, 도청자가 상태의 구성요소인 Qubit의 상태들을 알기 위해 임의의 물리적인 연산자를 사용하게 되는 경우 도청자의 물리적인 연산자에 의해 규정되는 Qubit의 선형결합으로 그 상태를 읽히지게 함으로써 도청이 원천적으로 불가능하

게 한다.

단일 Qubit은 물리적인 2 Level System은 모두 해당될 수 있는데 양자점의 경우 Exciton의 유무가  $|1\rangle$  과  $|0\rangle$  상태를 형성하여 대표적인 단일 Qubit이다. 하지만 본격적인 양자연산을 위해서는 얽힘상태를 만들 수 있는 Two-Qubit 시스템이 필수적이며 뷔츠브르그대학에서 발표한 결합 양자점을 이용하는 경우가 대표적인 예이다[18]. 그림 21은 InAs 결합 양자점구조의 개략도 및 실제 성장 예와 양자점 사이의 거리에 따른 Exciton의 에너지를 계산한 결과를 보여준다. 이러한 결합 양자점에서의 전자-정공쌍은 전자 및 정공의 위치에 따라 모두 4개의 서로 다른 상태를 형

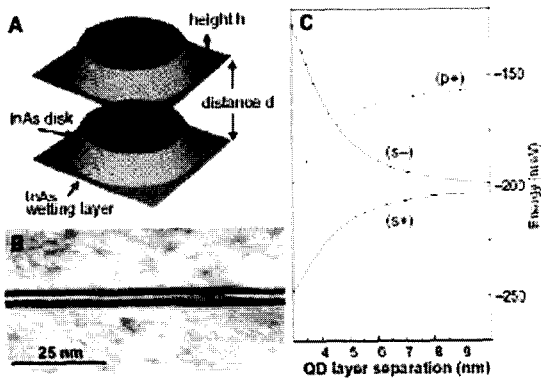


그림 21. InAs 결합 양자점 구조의 개략도 (A) 및 성장된 구조의 TEM 이미지 (B)와 양자점간 거리에 따른 Exciton의 에너지.

성할 수 있다. 그림 22는 결합 양자점내의 전자-정공 쌍으로 만들어지는 4개의 Basis를 보여준다. 이러한 4개의 상태는 각각  $|0,0\rangle$  상태는 전자와 정공이 모두 위쪽의 양자점에 위치하는 상태이고  $|0,1\rangle$  상태는 전자는 위쪽의 양자점에 정공은 아래쪽의 양자점에 위치하는 상태,  $|1,0\rangle$  은 전자는 아래쪽의 양자점에 정공은 위쪽의 양자점에 위치하는 상태,  $|1,1\rangle$ 은 전자와 정공 모두 아래쪽의 양자점에 위치하는 상태를 의미한다. 최근 뷔츠브르그 대학팀은 동일한 결합 양자점에서의 각 상태를 전기장을 인가함으로써 변화시킬 수 있음을 보여주었다. 이러한 결과는 향후 전기장 펄스를 이용한 양자정보처리에의 가능성을 보여준다고 할 수 있다.

KIST 나노소자연구센터에서도 결합 양자점을 이용한 Qubit 생성에 관한 기초연구가 수행되고 있으며, 그림 23은 KIST 나노소자 연구센터에서 In-fushing 방법으로 성장한 InAs 결합 양자점의 TEM 사진을 보여준다. 향후 현재 보유하고 있는 양자점 성장 및 제어기술을 바탕으로 측정 및 해석기술을 발전시켜 국내 양자점 기반 양자정보처리 기술 발전에 이바지 하고자 한다.

현재 양자컴퓨터의 실용화를 위한 미국의 로드맵 상에는 다음과 같은 요구사항이 실현되어야 한다고 명시되어 있다. 첫째, 무한대로 Qubit Set을 연결할 수 있어야 한다. 둘째, 모든 Qubit을 처음상태로 되

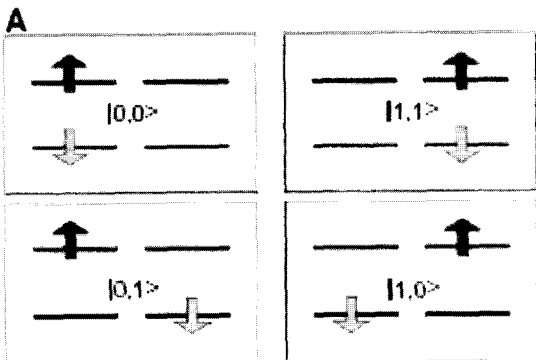


그림 22. InAs 결합 양자점내의 전자 및 정공의 위치에 따른 4개의 Basis.

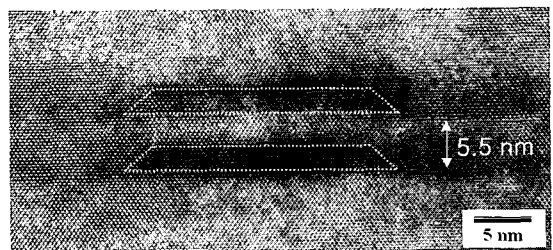


그림 23. KIST 나노소자연구센터에서 MBE 방법으로 성장된 InAs 결합 양자점의 TEM 이미지.

둘러 Setting 할 수 있어야 한다. 셋째, Qubit간의 상호작용은 양자 논리 게이트의 제작할 수 있을 정도로 충분히 조절 가능해야 한다. 넷째, 이러한 논리 게이트의 동작을 위해 양자적 특성을 잃어버리는 시간은 수 밀리초나 혹은 수초 정도로 게이트의 동작시간보다 충분히 길어야 한다. 다섯째, 양자상태의 검출기술이 필수적이다. 여섯째, 컴퓨터의 회로화를 위해 메모리 Qubit에서 동작 Qubit으로의 혹은 그 반대의 공정이 반드시 가능해야 한다. 일곱 번째, 연산중인 Qubit들을 정해진 위치에 매우 정교하게 이동시킬 수 있어야 한다. 양자컴퓨터의 실용화를 위한 이러한 일곱 개의 요구조건은 현 상태에서 실현하기 매우 어려운 기술적인 난제들이다. 하지만 이러한 난제들을 해결하려고 노력하는 중에 쌓이는 기술은 나노기술의 실용화를 위해 매우 필요한 기술로 파급효과가 매우 크다고 여겨지며 국가적인 지원이 필요한 기초과학분야라 할 수 있다.

### 5. 결론

나노포토닉스와 양자정보처리를 위해 매우 중요하다고 인식되고 있는 InAs/GaAs 양자점의 특성과 각 분야에서의 전 세계적인 연구성과 및 이들 각 분야에 관련하여 KIST에서 연구되고 있는 결과에 대해 간략하게 소개하였다. InAs 양자점을 기반으로 하는 나노포토닉스 분야에서 핵심 기술은 In(Ga)As/GaAs 양자점의 성장 및 제어 기술의 확보에 있다. 본고에서는 양자점이 가지고 있는 다양한 특성을 이용하기 위한 양자점 제어기술을 통하여 성장된 고밀도 양자점의 응용으로서 양자점 LD, 양자점 SLD 및 양자점 원적외선 수광소자와 같은 현 단계의 광소자의 특성을 향상시킬 수 있는 응용소자들에 대한 소개와 저밀도 양자점의 응용으로서 양자암호통신 및 양자컴퓨터의 제작을 위한 기초기술에 대한 소개가 있었다.

\* 본고는 물리학과 첨단기술에 게재 되었던 내용입니다.

### 참고 문헌

[1] D. Leonard, K. Pond and P.M. Petroff, Phys. Rev.

B50, 11687 (1994).  
 [2] A. Madhukar, Q. Xie, P. Chen and A. Konkar, Appl. Phys. Lett. 64, 2727 (1994).  
 [3] N. K. Cho, S. P. Ryu, J. D. Song, W. J. Choi, J. I. Lee, H. Jeon, Appl. Phys. Lett., 88, 133104 (2006)  
 [4] P. Bhattacharya, S, Ghosh, Appl. Phys. Lett., 80, 3482 (2002)  
 [5] V. M. Ustinov, et al., Appl. Phys. Lett., 74, 2815 (1999)  
 [6] Kenichi Nishi, et al., Appl. Phys. Lett., 74, (1999)  
 [7] G. Park, et al., Appl. Phys. Lett., 75, 3267 (1999)  
 [8] K. Mukai, et al., IEEE Photonics Technol. Lett., 11, 1205 (1999)  
 [9] F. Klopf, et al., Electron. Lett., 37, 634 (2001)  
 [10] D. C. Heo, J. D. Song, W. J. Choi, J. I. Lee, J. C. Jung and I. K. Han, Electron. Lett., 39, 863 (2003)  
 [11] Sanjay Krishna et al., Appl. Phys. Lett., 86, 193501 (2005)  
 [12] K. T. Posani, et al., Appl. Phys. Lett., 88, 151104 (2006)  
 [13] Nature, 405, 923 (2000)  
 [14] Science, 290, 102 (2002)  
 [15] Science, 290, 2282 (2002)  
 [16] Nature, 432, 197 (2004)  
 [17] Nature, 432, 200 (2004)  
 [18] Science, 291, 491 (2001)

### 저|자|약|력



성 명 : 최원준

◆ 학 력

- 1986년 서강대 물리학과 이학사
- 1988년 서강대 대학원 물리학과 이학석사
- 1996년 서강대 대학원 물리학과 이학박사

◆ 경 력

- 1990년 - 현재 KIST 나노소자연구센터 책임연구원
- 1997년 - 1998년 UC Santa Barbara 방문연구원
- 2000년 - 2004년 중앙대 전자공학부 겸임교수