

양자점 LD

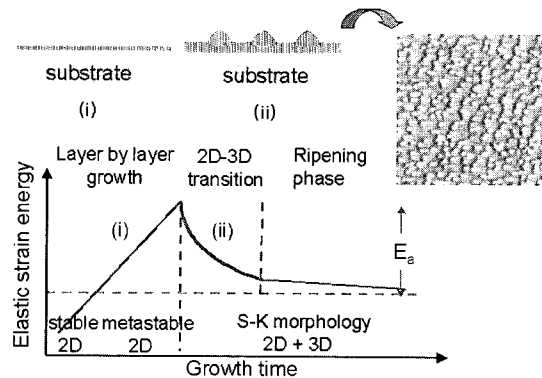
최 원 준, 한 일 기, 박 용 주
한국과학기술연구원 나노소자연구센터

I. 서 론

양자점은 단결정에 매우 밴드갭이 작은 물질을 삽입함으로써 만들어지는 미세 구조이다. 이러한 구조는 매우 특별한 이중접합구조 LD의 기본적인 원리의 변형 내지는 확대를 야기시키며, 새롭고 진전된 응용을 가능케 한다. 양자효과를 극대화하여 LD에 응용하는 양자점 LD는 이론적으로는 1982년에 Arakawa 등에^[1] 의해 매우 일찍 그 효용성이 예측되고 1993년 Ledentsov 등에^[2] 의해 처음 성공적인 발전이 보고되었지만, 양자점 LD는 양자우물 LD에 비해 매우 도전적인 분야로 인식되어 왔다. 하지만 최근 발전된 화합물 반도체 성장기법에 의해 매우 조밀한 크기와 균질하고 defect에 민감하지 않은 양자점군의 자발 성장기법이 개발되면서 양자점을 활성층으로 사용하는 양자점 LD의 특성들이 양자우물 LD에 비해 상대적으로 좋은 결과를 보여주고 있으며, 몇몇 분야에서 중요한 응용이 가능한 것으로 예측되고 있다. 본고에서는 최근 활발히 연구되고 있는 양자점 LD에 관한 개략적인 소개를 한다.

II. 반도체 양자점 성장

화합물 반도체의 영차원계(혹은 양자점 구조)를 이용한 소자화 기술은 90년대 중반 자발형성 양자점 성장기술이 성숙되면서^[3,4] 급속하게 연구가 전개되고 있다^[5]. 아직까지는 연구개발 단계라

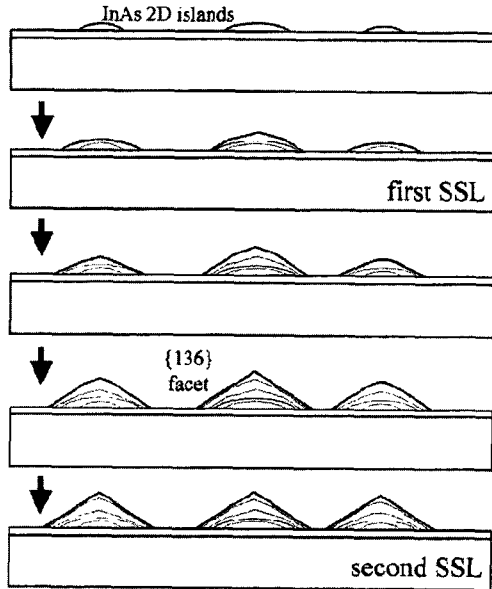


〈그림 1〉 S-K 성장방식에 의한 자발형성양자점의 형성 원리 개략도.

고 할 수 있지만 InGaAs/GaAs, InGaAs/InP 등과 같은 화합물반도체의 재료를 이용하는 양자점에 관한 연구가 주를 이루고 있다.

격자 부정합계를 기반으로 하는 S-K 성장방식^[6]은 무결합의 양자점 구조를 성장하는데 매우 중요한 기술로 사용되고 있다. 이 성장방식은 기판과 격자상수가 다른 박막성장이 이루어질 때 수 원자층의 평면 성장 후에 수-수십 nm 크기의 삼차원 구조인 양자점이 자발적으로 형성되는 원리를 가지고 있다.〈그림 1 참조〉 이는 성장막의 strain 에너지가 표면 에너지를 능가하기 때문에 발생된다.

In-situ 성장방식에 따른 무결합 및 간단한 공정에 의해 형성되는 자발형성 양자점은 여러 가지 잇점에도 불구하고 자발형성 양자점의 본래의 특성인 크기 불균일 분포와 위치제어의 어려움 등으로 인해 다양한 소자로의 응용에 몇 가지 문제점을 안고 있다. 따라서 보다 현실적인 소자용



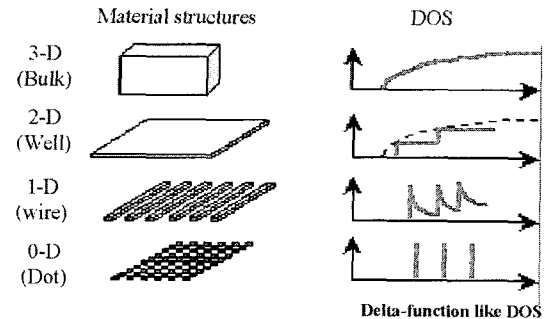
〈그림 2〉 Self-size-limiting 방식의 개략도.

용을 위하여 S-K 성장방식에 의한 자발형성 양자점의 균일도 향상, 고밀도 양자점 성장, 그리고 규칙적으로 배열화 된 양자점의 성장에 관한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 특히 양자점의 수직 적층기술은 유효 양자점 밀도를 향상시킬 수 있는 현실적인 방법으로 현재 제조되고 있는 대부분의 소자구조에 사용되고 있다.

최근 발표된 균일한 양자점의 성장방법으로써 self-size-limiting (SSL) 방법(그림 2 참조)을 이용하면 매우 향상된 특성의 크기분포(직경: 4% 이내, 높이: 8% 이내)를 얻을 수 있다^[7]. 이같은 고균질의 양자점 성장방법이 계속적으로 개발된다면 가까운 시일내에 양자점을 이용한 나노소자의 구현이 보다 현실화 될 것으로 예상된다.

III. 양자점 LD의 특성

〈그림 1〉은 반도체에서 전자가 드브로이 파장 이하의 구속을 가질 때의 상태밀도를 보여준다.



〈그림 3〉 반도체에서 양자구속의 증가에 따른 전자의 상태밀도함수

그림에서 보는 바와 같이 3차원적으로 구속된 전자는 0-차원의 자유도를 갖게 되며, 이 경우 양자점은 자유원자와 같은 δ -함수형의 상태밀도를 갖게 된다.

이러한 크기가 양자화된 양자점을 LD의 활성층으로 사용할 때의 장점은, 이러한 구조가 밴드 갭단에서 많은 상태밀도를 제공함으로써 비평형 상태의 주입된 운반자들이 매우 좁은 에너지 상태를 갖게 하는 데에 있다. 이러한 경우 최대 물질이득을 증가하게 되어 양자점 LD는 낮은 문턱 전류밀도를 갖는다. 현재 발표되는 양자점 LD의 문턱 전류밀도는 16 A/cm^2 정도로 양자우물 LD의 60 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 Michigan 대의 Bhattacharya 그룹의 발표에 의하면 양자점 LD의 특성온도는 상온 근처에서 273 K 이다^[8].

양자점 LD에서는 주입된 운반자가 공간적으로 양자점에 국재화되고 이로 인한 굴절을 변화가 매우 적기 때문에, linewidth enhancement factor가 매우 작아지므로 양자점 LD는 매우 적은 chirping하에서 고속 동작이 가능하다. 이는 기존 양자우물을 기반으로 하는 광소자가 갖는 고속 동작시 큰 chirping을 갖는 단점을 극복할 수 있는 장점이다. 최근 Michigan 대의 Bhattacharya 그룹에서는 상온에서 측정할 수 없는 정도로 작은 chirping을 갖는 15GHz의 직접변조 대역폭의 양자점 LD를 보고한 바가 있다^[8].

낮은 Auger 효과와 운반자 구속효과에 기인한 높은 온도 안정성 때문에 양자점을 이용한 고효율 LD는 양자우물 LD에 비해 매우 좋은 특성들이 보고되고 있다. 최근에는 Bimberg 그룹에서 상온 연속동작시 4W의 출력에서 95%의 양자효율과 51%의 전력 변환효율을 갖는 1.3 μm 대 고효율 LD를 발표하였다. 특히 이들은 단일 모드로 100mW까지 kink-free 동작이 가능함을 보고한 바도 있는데 이는 양자우물 LD에 비해 매우 놀라운 수준이다. 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 100W급의 고효율 LD의 제작이 가능하리라 기대되고 있다.

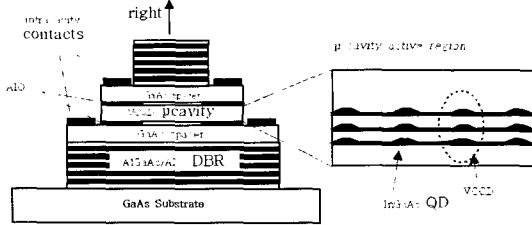
IV. 양자점 LD의 문제점과 해결방법

비록 양자점이 원자준위와 같은 에너지상태를 갖고, 이로 인해 델타함수와 같은 상태밀도를 갖음으로 양자점 LD가 고이득에 의한 낮은 문턱 전류밀도, 높은 미분이득, 운반자의 구속 및 적은 Auger process에 의한 열적 안정성을 갖는 것으로 발표되고 있기는 하지만, 양자점의 성장 특성상 야기되는 양자점의 크기 및 성분의 불균일

과 낮은 기저에너지 상태밀도 및 낮은 장벽에너지로 인한 문제 때문에 이론적으로 예측되는 수준에 미치지 못하는 결과들이 발표되는 실정이다. 이러한 문제는 특히 낮은 양자점 밀도문제와 결부되어 양자점 LD의 경우 기저 상태에서의 낮은 modal gain을 유발하여 기저 상태 발진을 위해서는 매우 긴 소자를 필요로 하는 단점이 되기도 한다. 일반적으로 양자점의 기저상태 이득이 제한적이기 때문에 여러층의 양자점을 적층하는 방법이 일반적이긴 하지만 상대적으로 여기상태의 이득보다도 작은 기저상태의 이득을 고려할 때 기저 상태 발진을 위해서는 광손실이 적은 도파로의 제작이 필수적이다^[9].

양자점이 갖는 여러 문제점은 그간 양자점의 성장 연구를 통하여 활발히 해결이 모색되어 왔는데 그 중 대표적인 방법들이 양자점의 적층방법, 양자점을 양자우물에 삽입하는 방법 및 양자점의 형성시 높은 밴드갭 물질을 matrix로 사용하는 방법 등이다. 양자점을 적층하는 경우 스트레인에 의한 효과에 의해 비슷한 크기의 양자점이 적층되고 이들의 상태가 상호 결합하여 상대적으로 높은 기저상태밀도를 갖게 하며 열적으로 안정된 상태를 유지하게 된다. 이러한 양자점이 수직으로 열을 이룬 Vertically-Coupled QD (VCQD) 구조에서는 각 열 사이 양자점들 간의 coupling effect가 나타나 PL (photoluminescence) line이 낮은 에너지로 이동하게 되고 PL width가 감소하며, 온도에 대한 안정성이 증가하게 되며 적층으로 인한 이득의 증가가 고효율의 열적 안정성을 지닌 고효율 레이저 다이오드의 제작을 가능하게 한다. 또한 matrix 물질의 밴드갭을 증가시키는 경우 열적으로 여기되어 양자점을 이탈하는 운반자를 줄일 수 있게 된다.

양자우물에 비해 상대적으로 적은 양자점 밀도의 영향은 양자우물 구조에 비해 상대적으로 적은 modal gain을 유발하는데 이는 고반사막을 레이저의 반사면에 도입함으로써 해결되고 있으며 그중 대표적인 시도가 고반사 DBR (Distributed Bragg Reflector)를 도입한 VCSEL (Ver-



〈그림 4〉 양자점 VCSEL(vertical coupled surface emitting laser) 구조도

tical Cavity Surface Emitting Laser)의 시도이다^[10]. 위 그림은 VCQD를 활성층으로 사용하고 intra-cavity contact 형의 VCSEL의 개략도이다.

V. 장파장 양자점 LD

자발성장 양자점군의 성장기법의 발달에 따라 최근 좋은 특성의 양자점 LD가 많이 보고되고 있다. 양자점을 활성층으로 하는 경우 넓은 파장 영역에서 LD를 제작할 수 있으나 특히 광통신대역의 양자점 LD 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 광통신대역의 양자점은 In(Ga)As 양자점이며 기판으로 GaAs와 InP를 사용할 수 있다.

양자점을 이용하는 경우 상대적으로 값싸며 고속전자소자인 HEMT나 HBT 등의 기판으로 사용되는 GaAs 기판상에 단거리용 광통신대역인 1.3 μm 대역의 레이저 다이오드를 만들 수 있는 장점이 있어 고속전자소자와의 집적화를 염두에 두고 GaAs 기판상에 InGaAs 양자점에 관한 연구가 활발하다.

In(Ga)As/GaAs 양자점 LD에 비해 InAs/InP 양자점은 PL 파장이 1.3~1.7 μm 으로 다양하나 기술적인 이유로 LD에 관한 연구결과는 비교적 최근에 활발히 연구되고 있다^[11]. 하지만 여전히 구조 성장의 문제로 발진개시 문턱전류 밀도는 매우 높으며 상대적으로 잘 발달된 InP

기반 양자우물 LD의 특성을 추월하지 못하고 있다. 따라서 InAs/InP 양자점은 LD로의 개발로서가 아니라 양자점이 갖는 특성을 이용한 광증폭기로서 많이 연구되고 있다^[12]. 이에 본고에서는 이 분야에 관한 부분은 생략하기로 한다.

1. GaAs계 In(Ga)As edge emitting LD
광통신에서 1.28-1.32 μm 파장대는 2-10km의 거리영역에서 data 통신에 이용되는 중요한 파장대역이다. 양자우물을 활성층으로 사용하는 경우 이 파장대역을 위한 물질계는 InGaAsP/InP 혹은 InGaAlAs/InP이다. InP는 GaAs에 비해 상대적으로 열전도도가 낮으므로 InP계 양자우물 LD의 안정된 동작을 위해서는 TEC(Thermo-Electric Cooler)를 이용한 온도 안정화가 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 μm 파장대역에서 cooler-less LD 제작을 위한 적합한 활성층이라 할 수 있다.

GaAs 기판상에서의 In(Ga)As 양자점 LD의 장파장 발진은 양자점의 기저 상태 발진을 통해 이루어질 수 있다. 1.3 μm 파장대역 In(Ga)As 양자점의 상은 PL spectrum을 얻을 수는 있지만^[13,14], 양자우물과는 달리 양자점의 기저상태에서의 이득이 여기상태보다는 작고 modal gain이 작은 이유 때문에 기저상태 발진을 얻기가 어렵다. 이러한 이유 때문에 기저상태 발진은 양자점을 적층하여 기저상태 이득포화를 상쇄한 상태에서 cavity 길이가 길게 하거나 혹은 LD의 양단면에 고반사막을 증착함으로써 실현되었다^[15,16]. 특히 독일의 Wurzburg 대 그룹은 metal grating을 사용하여 1.3 μm 대의 광궤환을 극대화 시킴으로써 1.3 μm 양자점 LD를 발진시킨 바 있다^[17].

GaAs matrix에 성장된 양자점을 활성층으로 사용하는 경우 기저상태 발진을 위해서는 양자점의 밀도를 높게 하고 양자점을 적층하는 방법을 사용하였다. 하지만 미국의 New Mexico 대 그룹에서는 InAs 양자점을 InGaAs 양자우물 안에 위치시킴으로써 운반자가 효율적으로 양자점에 포획되는 dots-in-a-well(DWELL) 구조를 사용하였다. 그들의 보고에 따르면 InGaAs 양자우물을 도입함으로써 운반자 포획이 증가하고 이로 인해 발진개시 문턱전압이 낮아질 뿐만 아니라 특성온도가 증가한다. DWELL 구조 양자점 LD의 경우 InGaAs 양자우물의 In 양이 20%까지 증가할 때 내부 효율이 증가하며 또한 GaAs matrix를 사용하는 경우와 마찬가지로 DWELL을 적층하는 경우 내부효율이 증가하고 기저상태의 modal gain이 증가한다^[18]. 이들은 이러한 구조를 이용하여 상온에서 16A/cm²의 발진개시 문턱전류밀도를 얻었다.

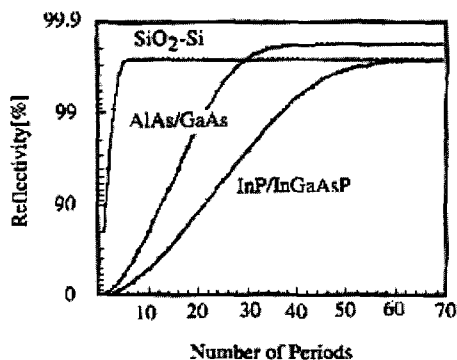
운반자가 3차원적으로 구속된 양자점 LD는 높은 특성온도를 갖을 것으로 기대되지만, 기저상태 발진에서 온도가 상온근처에서는 특성이 매우 열화 되어 DWELL의 경우 상온근처에서 84K를 갖는 것으로 보고된다^[18]. 이러한 상온근처에서의 특성온도의 급격한 열화는 기저상태 이득포화의 온도의존성 때문이라 이해되고 있다^[19]. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 DWELL 구조를 사용하여 운반자 포획을 증가시키고, 양자점의 밀도를 높이고 적층을 통하여 기저상태 이득을 증가시켜야 하지만 무엇보다도 양자점의 기저상태 천이에너지와 여기상태 천이에너지 사이의 차가 커야 한다^[20]. 최근에는 p-type modulation doping이 10meV 정도로 매우 작은 hole state 간격 효과를 보상하여 기저상태의 최대 이득을 증가시킴으로써 고온에서 기저상태 이득포화를 방지하는 방법이 제안되었다^[21]. 미국 Texas Austin의 Deppe 그룹은 양자점에 p-type modulation doping을 통해 161°C 까지 기저상태 발진에 성공하였으며 이들이 발표한 특성온도는 0°C~80°C 온도구간에서 연속발진 상태로

196K, 펄스발진 상태로 213K였다^[22]. 이러한 양자점 LD의 특성온도는 InP 기반의 장파장 LD의 70~80K에 비해 매우 높은 값으로 1.3μm 대 uncooled LD의 제작을 보장한다.

양자점 LD에 운반자가 주입되는 경우 주입된 전자는 우선 wetting layer나 혹은 양자점의 여기상태를 채우게 되고 이후 기저상태로 천이하게 된다. 이때의 높은 에너지 상태에서 기저상태로의 이완시간은 상온에서 50~100ps 으로 양자우물에 비해 매우 느리다^[23]. 이러한 현상은 소위 hot electron 효과를 야기시켜 운반자를 기저상태에서 여기상태나 혹은 장벽층으로 탈출하게 함으로써 이득을 감소시키고 소자의 빠른 동작을 방해하게 된다. 따라서 비록 양자점의 미분이득이 크더라도 양자점 LD의 직접변조속도는 제한되게 된다. 따라서 온도를 낮추어 hot carrier 효과를 감소시키게 되면 효과적인 전자와 홀의 산란에 의해 전자가 쉽게 기저상태로 전이할 수 있게 되어 양자점 LD의 직접변조속도가 증가하게 된다^[24]. 상온에서 변조속도를 제한하는 hot electron 효과를 감소시키기 위해 Michigan대의 Bhattacharya 그룹에서는 양자우물과 양자점간의 phonon을 매개로 하는 tunneling을 이용하여 양자우물에서 양자점으로 cold electron을 주입함으로써 상온에서 22GHz의 3-dB bandwidth를 갖는 직접변조 양자점 LD를 제작하였다^[25]. 이들의 발표에 따르면 10GHz 이상의 고속동작에서도 선폭증가 요소, $\alpha \sim 1$, chirp < 0.6 Å이었다. Tunneling 구조를 이용하지 않는 경우, 독일 Wurzburg의 Forchel 팀은 3-dB bandwidth가 상온에서 5.9GHz인 DFB 구조를 갖는 양자점 LD를 제작 발표하였다^[26]. 또한 최근 Texas Austin의 Deppe 그룹은 기존의 양자점 LD의 변조속도가 작은 것은 매우 조밀한 홀 상태와 양자점의 크기 및 조성의 불균일에 기인하는 불균일 선폭에 기인하는 것으로 해석하였으며, p-type modulation doping의 도입으로 기저상태 이득의 증가와 변조속도의 증가를 예견한 바 있다^[27].

2. GaAs계 InGaAs VCSEL

VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting-Laser)은 발진 광모드의 형태가 광섬유의 도파모드와 비슷해서 결합손실이 적고 광섬유와의 결합을 통한 소자의 실장시 용이한 장점을 갖고 wafer 상태에서 측정이 가능한 장점을 갖는다. 광통신용 장파장 VCSEL의 제작을 위해 InP 기판을 사용하는 경우, <그림 5>에 보는 바와 같이 DBP 제작을 위해 사용되는 InP/InGaAsP (InGaAlAs)의 경우가 GaAs/AlAs를 사용하는 것에 비해 2배 이상의 stack을 해주어야 함을 알 수 있다. 따라서 InP 계열의 물질을 사용하는 경우 DBR의 두께가 두꺼워지므로 활성층에서 발생하는 열을 쉽게 제거할 수 없는 단점이 있으며, 광손실이 커서 발진에 큰 문제를 야기한다. 하지만 GaAs 기판을 사용하고, 활성층으로 In(Ga)As 양자점 경우 적은 숫자의 GaAs/AlAs DBR mirror를 만들 수 있는 장점이 있으며, 특히 GaAs/AlAs DBR mirror를 사용하는 경우 기존의 잘 개발된 oxide aperture VCSEL을 제작할 수 있는 장점이 있어 매우 낮은 동작전류를 갖는 광통신대역의 VCSEL 개발이 가능하다. 특히 양자점이 갖는 안정된 열적 특성으로 인해 양자점을 활성층으로 하는 VCSEL은 낮은 동작전류 및 높은 온도 안정성을 지닐뿐만 아니라 고속 동작시 chirping이 유발되지 않는 광통신에 적합한 광소자이다. Bimberg 그룹은 이 분야에서 1.3 μm VCSEL을 발표한 바 있다.^[10]



<그림 5> 장파장 VCSEL 제작을 위한 DBR pair에 따른 반사율

3. 파장 가변 양자점 LD

자발형성 In(Ga)As/GaAs 양자점은 그 성장 방법의 특성상 넓은 불균일 선포를 갖는다. 특히 많은 운반자의 주입상태에서는 기저상태뿐만 아니라 여기상태들까지 gain을 갖게 되어 광대역 이득을 갖으므로 파장가변 LD를 위한 좋은 활성층으로 이해된다. 독일 Wurzburg 대학의 Forchel 그룹은 이러한 양자점의 특성을 이용하고 DFB LD의 metal grating을 조절함으로써 1.3 μm 파장대에서 동일한 양자점을 이용하여 36 nm span의 양자점 DFB LD를 제작하였다^[17]. 이들이 발표한 특성은 InP 기반의 양자우물 LD에 비해 우월한 특성이다. 특히 이 그룹은 binary superimposed grating을 이용하고 980 nm 파장대의 양자점을 활성층으로 하여 30 nm의 가변파장 범위를 갖는 dual section DFB LD를 제작하였다^[28]. 양자점의 넓은 이득을 이용하기 위해서는 external grating을 이용하는 것이 효율적이다. New Mexico 대학의 Lester 그룹은 1.3 μm 파장대의 DWELL 구조를 이용하고 external grating을 사용하여 150 nm의 파장가변을 얻은 바 있다^[29]. 이러한 가변 파장 양자점 LD 기술은 1.3 μm 파장대역에서 WDM 통신용 레이저 LD 제작을 위해 매우 유용하게 응용될 수 있다. 양자점은 성장조건에 따라 크기와 성분을 조절할 수 있으므로 광대역 gain을 얻기 위해서는 양자점의 적층시 서로 다른 조건에서 성장된 양자점을 각층에 도입함으로써 gain 선포를 증가시킬 수 있을 것이며 기존의 external grating 기술과 접목되면 광대역 파장 가변 LD의 개발이 가능할 것이다.

VI. 고효율 양자점 레이저 다이오드

양자점이 양자우물에 비하여 갖고 있는 여러 장점들은 그 동안 양자우물 기반의 고효율 레이저 다이오드가 수반한 문제점들을 극복할 수 있는 가능성을 제시한다. 앞서 이야기 된 바와 같이

만 여기에서 양자점이 갖는 여러 장점들 중 특히 고출력 레이저 다이오드와 관련된 사항들을 상기 하면, 낮은 문턱전류, 낮은 비발광 표면 결합 (non-radiative surface recombination), 이론적으로 무한대 값의 특성 온도 (characteristics temperature, T_0), 낮은 선폭 증가 요소 (linewidth enhancement factor, α -factor) 등이라 할 수 있다. 본 장에서는 이러한 여러 가지 장점들을 고려하여 지금까지 개발된 고출력 양자점 레이저 다이오드들의 특성을 설명하고, 앞으로의 연구 방향에 대하여 논의하기로 한다.

일반적인 양자점 레이저 다이오드와 마찬가지로 양자점을 이용하는 고출력 레이저 다이오드의 경우에도 성장방법은 주로 MBE 또는 MOCVD 성장법을 이용하고, GaAs 기판에 AlGaAs 층을 클래딩층으로, In(Ga)As를 양자점으로 이용한다. 양자점은 주로 485~510°C 온도 범위에서 성장하는데 이는 양자점 성장에는 적당하나 장벽 층이나 클래딩층에 낮은 성장온도로 인한 결함을 유발하는 요인이 되므로 보통 클래딩층은 600°C 이상의 온도에서 성장한다. GaAs를 기판으로 사용하므로 발진파장은 통상 1000nm~1300nm 범위의 특성을 나타낸다. <표 1>은 현재까지 발

표된 고출력 양자점 레이저 다이오드의 특성을 비교하여 나타낸 것이다^[130-34].

현재까지 개발된 고출력 양자점 레이저 다이오드의 문턱전류 밀도 중 가장 낮은 문턱전류 밀도를 나타낸 것은 <표 1>에 나타낸 바와 같이 92 A/cm²인데, 이는 Bimberg 그룹이 MBE로 InAs 양자점 성장후 In_{0.13}Ga_{0.87}As 켈 층을 성장한 3개 적층된 InAs/GaAs 양자점 구조를 가진 레이저 다이오드에서 구현되었으나^[34], 통상은 200~300 A/cm² 정도의 수준에 이른다. 이는 양자우물 구조에서 개발된 고출력 대면적 레이저 다이오드에서 가장 낮은 문턱전류밀도 값인 270 A/cm²과 유사한 특성이다^[35].

Bimberg 그룹과 유사하게 중국의 Chinese Academy Sciences의 Wang 원사 그룹도 5개 적층된 InAs/GaAs 양자점 성장에서 InAs 양자점 성장 후 InGaAs SRL (strain reducing layer)를 성장하여 slope efficiency가 84.6%이며, 연속발전 광출력이 3.6 W인 고출력 양자점 레이저 다이오드를 제작하였다^[30]. 여기에서 SRL은 InAs 양자점 성장시 또는 칩 본딩시 발생할 수 있는 stress를 억제시켜서 보통의 GaAs 기반 반도체 레이저 다이오드에서 발생하는 DLD

<표 1> 고출력 양자점 대면적 레이저 다이오드의 특성 비교

Growth	QD 구조	파장 (nm)	Power @RT (W)	Characteristics	Life time	Idea	Ref.
MBE	5 stacked InAs/GaAs	1080	3.6	SE: 84.6% J_{th} : 221 A/cm ²	-5.6%@1kh 9kh	InGaAs SRL	30
MOCVD	6 stacked InGaAs/GaAs	1135	4.7	SE: 57% J_{th} : 216 A/cm ² T_0 : 73K to 50°C	3kh @1.5W & @50°C		31
MOCVD	3 stacked InGaAs	1140	3.7 pulse	SE: 85% J_{th} : 110 A/cm ²		anneal & interrupt	32
MBE	10 stacked InGaAs/AlGaAs	950	1	SE: 22% J_{th} : 290 A/cm ²		VCQD	33
MBE	3 stacked InAs/GaAs	1280	2.7	SE: 50% J_{th} : 92 A/cm ²		InGaAs SRL	34

SE: slope efficiency,
kh: 1,000 hour,
 T_0 : Characteristic temperature,

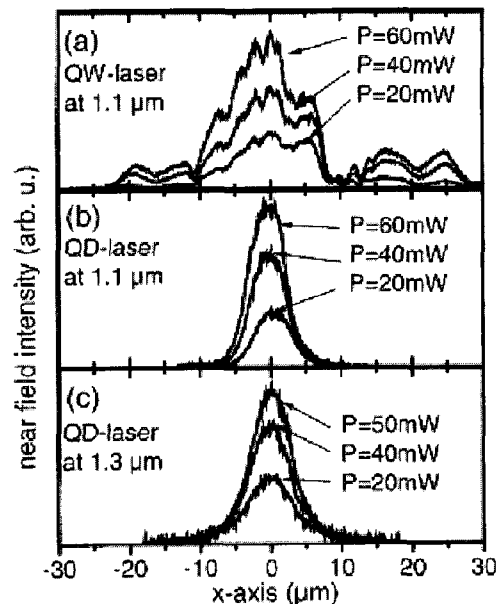
J_{th} : threshold current density
SRL: strain reducing layer
VCQD: vertically coupled QD

(dark line defect)를 감소시키고 따라서 고출력 양자점 레이저 다이오드의 수명을 증가시키는 효과를 가져온다. 광출력의 -3dB를 레이저 다이오드의 수명이라 고려할 때, InGaAs SRL를 포함한 InAs 양자점 레이저 다이오드의 수명은 약 9,000 시간에 이르고, 이는 양자우물 고출력 레이저 다이오드의 수명과 비슷한 수준에 도달하고 있음을 설명한다. GaAs/AlGaAs 양자우물 기반의 고출력 레이저 다이오드와 달리 특별한 표면 코팅 없이 9,000 시간의 수명을 유지할 수 있는 것은 양자점의 장점 중의 하나인 표면에서의 낮은 전자-홀 재결합 특성 때문이다.

광출력면에서 가장 큰 특성을 나타낸 것은 Bimberg 그룹의 MOCVD로 성장한 6개 적층 InGaAs/GaAs 양자점 레이저 다이오드이다. 광출력은 연속발진으로 약 4.7W를, 준연속발진(quasi-CW)으로 약 11.7W에 도달하였다^[31]. Bimberg 그룹은 장벽층에 형성된 결함을 감소시키기 위하여 InAs 성장 후 처음 2~3nm는 양자점 성장온도에서 GaAs 장벽층을 성장시킨 후 온도를 600°C까지 증가시키면서 4~5nm 두께의 GaAs 장벽층을 추가로 성장한 후 10~30분간 열처리를 하였다. 이는 양자점의 낮은 성장온도로 인한 장벽층에 형성된 결함을 해결함으로써 더욱 높은 광출력 특성을 가진 양자점 레이저 다이오드가 제작될 수 있음을 설명한다.

이상의 여러 가지 고출력 양자점 레이저 다이오드의 특성을 보면, 기존의 양자우물 기반에서 나타낸 특성을 능가하거나 비슷한 수준에 도달되어 있음을 알 수 있다. 그러나 무엇보다도 양자점을 이용하는 장점 중의 하나이고 아직 남아있는 관심사 중의 하나는 α -factor와 필라멘테이션의 관계를 규명하는 것이다. 이론적으로 양자점 레이저 다이오드의 α -factor는 운반자 밀도와 크기의 비균일성에 따라서 -3~1 사이의 값을 갖는다고 발표된 바 있다^[36]. 실험적으로 양자점 구조에서 측정된 α -factor의 값은 문턱전류 아래에서 0.1을 나타낸 바 있다^[37]. 이와 같은 값들은 통상의 양자우물 기반의 레이저 다이오드가 갖는 $\alpha=2\sim 4$ 에 비해 대단히 작은 값이다. Marciante

등은 대면적 레이저 다이오드의 필라멘테이션은 α 값이 크기 때문이며 따라서 α 를 감소시키면 필라멘테이션이 억제될 수 있고, 예를 들어 $\alpha < 0.4$ 인 경우에는 대면적 레이저 다이오드의 aperture 크기가 250 μm 일 경우에도 필라멘테이션이 일어나지 않는다는 이론적인 계산을 발표하였다^[38]. 그러나 $\alpha < 0.4$ 는 양자우물 기반의 레이저 다이오드에서는 얻어지지 않는 값이어서 증명할 수 없었으나 양자점 기반의 레이저 다이오드 구조에서는 가능한 값이다. 이와 같은 이론적 배경에서 최근 몇몇 연구 그룹에서 이에 관한 연구를 진행하고 있다. 현재까지의 결과로는 양자점 레이저 다이오드는 ridge의 aperture가 8 μm 일 경우에도 $M^2 < 2$ (여기에서 M^2 는 beam quality를 나타내는 factor로서 통상 $M^2 < 2$ 일 경우에 광섬유와의 결합이 용이함)이라는 특성을 나타내는데 반하여, 양자우물 레이저 다이오드에서는 ridge의 aperture가 3 μm 일 경우에도 $M^2 > 2$ 인 특성이 실험적으로 보고된 정도이다. <그림 6>은 양자우물과 양자점 기반의 레이저 다이오드에서 광출력에 따른 근접장의 모습을 나타낸 것으로



<그림 6> 양자점과 양자우물 레이저 다이오드의 근접장 단면도 (6 $\mu\text{m} \times 1.3 \text{mm}$)^[39].

양자점 기반의 레이저 다이오드의 경우 필라멘테이션이 거의 일어나지 않는 것을 확인할 수 있는 좋은 예이다. 그러나 현재까지 보고된 바로는 문턱전류 근처에서 양자점 레이저 다이오드의 α -factor의 값을 측정할 경우나, 또는 α -factor의 값에 따라서 필라멘테이션이 억제되는 aperture의 크기가 어느 정도인지 실험적으로 증명된 바 없으므로, 이에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

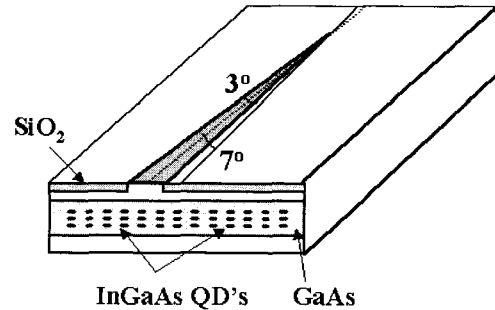
VII. 양자점 superluminescent diodes(SLDs)

지금까지 양자점의 소자 응용은 레이저 다이오드에 한정되어 있었다. 최근에 양자점을 이용한 광증폭기의 이론적 연구가 진행되고 있으나 양자점의 광소자 응용범위는 극히 제한적이었다. 본 장에서는 레이저 다이오드로의 응용과는 달리, 양자점의 크기에 있어서 비균일성이 오히려 장점이 되는 광소자가 있음을 소개하면서 양자점의 소자 응용 범위를 확장하고자 한다.

Superluminescent diodes(SLDs)는 파장대역폭이 LED처럼 넓고 광출력은 LED 보다 훨씬 큰 광원을 의미한다. SLDs의 응용 분야는 파장대역폭이 넓은 광원이 요구되는 OCT(optical coherence tomography), spectrum slicing을 이용한 WDM-PON 광원, 광섬유 자이로스코프 등이라 할 수 있다.

지금까지 개발된 양자우물 기반 SLDs에서 파장대역폭을 증가시키는 방법은 다층양자우물에서 개개의 양자우물의 두께를 변화시키는 chirped-QW 구조를 이용하는 것이었다^[40]. 그러나 양자점은 기본적으로 크기에 있어서 10% 내외의 균일도를 가지므로 특별히 chirped-QW 구조를 이용하지 않더라도 파장대역폭을 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 양자점을 이용한 SLDs는 양자점의 응용범위를 확장시키는 새로운 광원이라 할 수 있다.

〈그림 7〉은 KIST 나노소자연구센터에서 제작

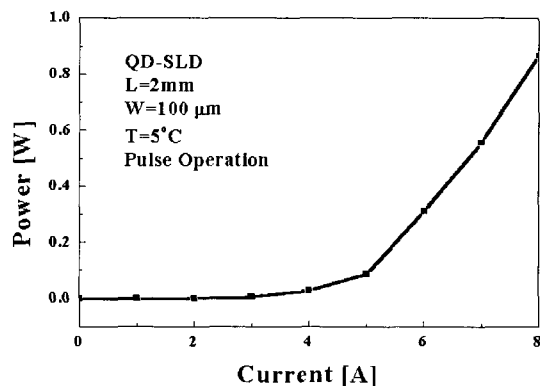


〈그림 7〉 InGaAs 양자점 SLD의 개략도

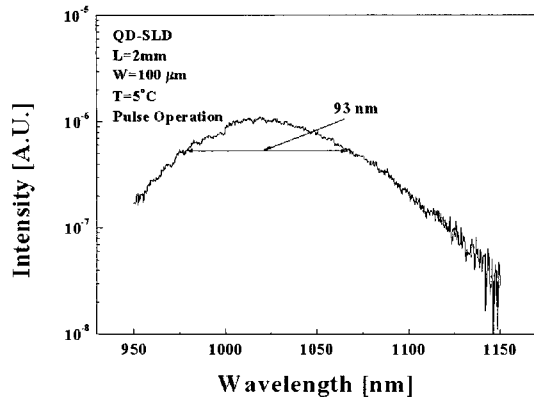
한 양자점 SLDs의 개략도를 나타낸 것이다.

〈그림 7〉에서 전극을 중심축으로부터 7도 기울인 것은 Fabry-Perot 모드 형성을 억제시키기 위한 것이다. 사용된 양자점은 ALE(atomic layer epitaxy) 기법으로 성장한 InGaAs 양자점이고, n 클래딩층을 제외한 모든 층은 양자점 성장 온도와 동일한 510°C에서 성장하였다. 양자점은 3stacked 하였고, 각 양자점층 사이는 40nm 두께의 GaAs로 분리시켰다.

〈그림 7〉과 〈그림 8〉은 3 stacked InGaAs 양자점 SLDs의 L-I 특성과 스펙트럼 특성을 나타낸 것이다. 광출력은 8A에서 약 0.9W (pulse mode)였고, 파장대역폭은 약 93nm로 측정되었다. 이와 같은 값은 chirped-QW 구조로 제작된 양자우물 SLDs의 파장대역폭 (약 60~80nm)보다 크고, 지금까지 보고된 광출력 1W (pulse mode)와 유사한 값이다^[40]. 이는



〈그림 8〉 3 stacked InGaAs 양자점 SLDs의 L-I 특성 곡선^[41]



〈그림 9〉 3 stacked InGaAs 양자점 SLDs의 스펙트럼 특성 곡선^[41].

과장대역폭과 광출력을 동시에 고려할 때 가장 우수한 특성의 SLDs라 할 수 있고, 따라서 양자점을 이용한 SLDs의 제작 가능성을 제시한다. Chirped-QW 구조처럼 다층 양자점 구조에서 각 양자점 층마다 크기가 다른 양자점 구조 (즉 chirped-QD)를 사용하면 보다 넓은 과장대역폭을 갖는 SLDs가 제작될 것으로 기대한다.

VIII. 결 론

본고에서는 3차원적으로 양자점에 구속된 운반자의 특성에 기인하는 양자점 LD의 특성, 장단점 및 문제의 해결방법 등에 관하여 고찰하였다. 현재 상용화된 양자우물 LD에 비해 연구가 시작된 기간은 길지 않지만 MBE 및 MOCVD 기술의 발달에 힘입어 그간 괄목할만한 성과들이 있었다. 양자우물 성장기술이 현재 사용되는 광통신 소자 및 전자소자의 핵심기술로 이분야에 획기적인 발전을 유도한 것처럼 양자점 기술은 향후 미래기술이라 여겨지는 양자 암호통신, 양자 연산 등에 핵심적인 기술로 인식되고 있다. 최근 국내에서도 이 분야의 연구가 활발하게 진행되고 있으므로 좋은 연구결과로 미래 기술을 확보하길 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Arakawa, H. Sakaki, Appl. Phys. Lett., 40, 939 (1982)
- [2] N. N. Ledentsov, et al., Semiconductors, 28, 832 (1994)
- [3] D. Leonard, K. Pond and P. M. Petroff, Phys. Rev. B50, 11687 (1994).
- [4] A. Madhukar, Q. Xie, P. Chen and A. Konkar, Appl. Phys. Lett. 64, 2727 (1994).
- [5] R. Notzel, J. Temmyo, A. Kozen, T. Tamamura, T. Fukui and H. Hasegawa, Appl. Phys. Lett. 66, 2525 (1995).
- [6] I. N. Stranski and V. L. Krastanov, Akad. Wiss. Lit. Mainz Math.-Natur. Kl. Iib 146, 797 (1939).
- [7] K. Yamaguchi, T. Kaizu, K. Yujobo, and Y. Saito, J. Crystal Growth 237-239, 1301-1306 (2002).
- [8] P. Bhattacharya, S, Ghosh, Appl. Phys. Lett., 80, 3482 (2002)
- [9] Levon V. Asryan, et al., IEEE J. Quantum electron., 37, 418 (2001)
- [10] J. A. Lott, et al., Electron. Lett., 36, 1384 (2000)
- [11] R. H. Wang, et al., IEEE Photonics Technol. Lett., 13, 767 (2001)
- [12] A. Bilenca, et al., Electronics Lett., 38, 1350 (2002)
- [13] V. M. Ustinov, et al., Appl. Phys. Lett., 74, 2815 (1999)
- [14] Kenichi Nishi, et al., Appl. Phys. Lett., 74, (1999)
- [15] G. Park, et al., Appl. Phys. Lett., 75, 3267 (1999)
- [16] K. Mukai, et al., IEEE Photonics Technol. Lett., 11, 1205 (1999)

- [17] F. Klopff, et al., *Electron. Lett.*, 37, 634 (2001)
- [18] G. T. Liu, et al., *IEEE J. Quantum electron.*, 36, 1272 (2000)
- [19] G. Park, et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, 36, 1065 (2000)
- [20] Oleg B. Shchekin, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 77, 466 (2000)
- [21] O. B. Shchekin, D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.*, 80, 3277 (2002)
- [22] O. B. Shchekin, D. G. Deppe, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 14, 1231 (2002)
- [23] J. Urayama, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 80, 2162 (2002)
- [24] D. Klotzkin, et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 10, 932 (1998)
- [25] S. Ghosh, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 81, 3055 (2002)
- [26] R. Krebs, et al., *Electronics Lett.*, 37, 1223 (2001)
- [27] O. B. Shchekin, D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.*, 80, 2758 (2002)
- [28] M. Muller, et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 14, 1246 (2002)
- [29] H. Li, et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 12, 759 (2000)
- [30] H. Y. Liu, B. Xu, Y. Q. Wei, D. Ding, J. J. Qian, Q. Han, J. B. Liang and Z. G. Wang, *Appl. Phys. Lett.* 79, 2868 (2001)
- [31] R. L. Sellin, C. Ribbat, D. Bimberg, P. Rinner, H. Konstanzer, M. T. Kelemen and M. Mikulla, *Electron. Lett.*, 38, 883 (2002)
- [32] R. L. Sellin, C. Ribbat, M. Grundmann, N. N. Ledentsov and D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.* 78, 1207 (2001)
- [33] M. V. Maximov, Y. M. Shernyakov, A. F. Tsatsulnikov, A. V. Lunev, A. V. Sakharov, V. M. Ustinov, A. Y. Egorov, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, P. S. Kopev, L. V. Asryan, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov, D. Bimberg, A. O. Kosogov and P. Werner, *J. Appl. Phys.*, 83, 5561 (1998)
- [34] M. Grundmann, F. Heinrichsdorff, N. Ledentsov, C. Ribbat, D. Bimberg, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, M. V. Maximov, Y. M. Shernyakov, D. A. Lifshits, V. M. Ustinov and Z. I. Alferov, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39, 2341 (2000)
- [35] J. Wang, B. Smith, X. Xie, X. Wang and G. T. Burnham, *Appl. Phys. Lett.*, 74, 1525 (1999)
- [36] P. M. Smowton, E. J. Pearce, H. C. Schneider, W. W. Chow and M. Hopkinson, *Appl. Phys. Lett.*, 81, 3251 (2002)
- [37] T. C. Newell, D. J. Bossert, A. Stintz, B. Fuchs, K. J. Malloy and L. F. Lester, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11, 1527 (1999)
- [38] J. R. Marciante and G. P. Agrawal, *IEEE J. Quantum. Electron.*, 32, 590 (1996)
- [39] C. Ribbat, R. L. Sellin, I. Kaiander, F. Hopfer, N. N. Ledentsov, D. Bimberg, A. R. Kovsh, V. M. Ustinov, A. E. Zhukov and M. V. Maximov, *Appl. Phys. Lett.*, 82, 952 (2003)
- [40] T. Yamatoya, S. Moru, F. Koyama and K. Iga, *Jpn. J. Appl. Phys.* 38, 5121 (1999)
- [41] D. C. Heo, J. D. Song, W. J. Choi, J. I. Lee, J. C. Jung and I. K. Han, *Electron. Lett.* (submitted).

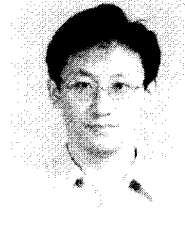
저자 소개



崔原準

1986년 2월 서강대학교 물리학과 학사, 1988년 8월 서강대학교 물리학과 석사, 1996년 3월 서강대학교 물리학과 박사, 1990년 2월~현재: KIST 나노소자연구센터 선임연구원, 1997년 8월~

1998년 8월: UC, Santa Barbara, 방문연구원, 1999년 3월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 겸임교수, <주관심 분야: 반도체 레이저(VCSEL, in-plane), 광변조기, 나노 포토닉스, 광집적회로 등>



朴鏞柱

1983년 2월 고려대학교 물리학과 학사, 1985년 2월 고려대학교 물리학과 석사, 1997년 2월 일본동경공업대 반도체공학 박사, 1994년 11월~1995년 10월: 이화학연구소(RIKEN) 객원연구원,

1988년 2월~현재: 한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 연구원/선임연구원, <주관심 분야: 반도체 결정성장, 양자점 광전소자, 스핀트로닉스>



韓日基

1985년 2월 연세대학교 물리학과 학사, 1987년 2월 연세대학교 물리학과 석사, 1996년 2월 연세대학교 물리학과 박사, 1989년 3월~1996년 2월: 한국과학기술연구원 연구원, 1996년 3월~현

재: 한국과학기술연구원 선임연구원, 1998년 7월~1999년 6월: U. Maryland (College Park) Research Associate, 2001년 7월~현재: 과기부 국가 지정연구실 실장 (고출력 반도체 광원연구실)>