

양자점 반도체광증폭기의 WDM 광통신 응용

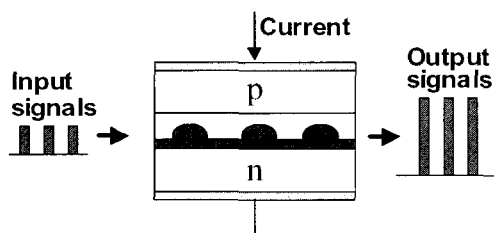
이 동 한

충남대학교 물리학과

I. 서 론

나노 구조의 재료를 이용한 소자의 구현은 반도체 양자점을 이용한 광소자에서 가장 먼저 이루어질 것으로 보인다. 반도체 양자점은 실용화에 용이한 반도체의 성질을 가지면서 영차원 양자구조의 특성을 가지고 있어 기존에는 불가능하였던 소자의 구현을 가능하게 한다. 중요성이 아주 큰 신기능 광소자 대표적인 소자로 양자점 반도체광증폭기(SOA)를 들 수 있다. 기존의 벌크나 양자우물구조형의 SOA는 여러 채널의 신호를 동시에 처리해야 하는 WDM 광통신시스템에서는 이득 포화 현상에 의해 채널간 간섭을 일으켜 사실상 사용이 어렵다. 이에 반해 양자점 SOA는 여러 파장의 약해진 신호광을 간섭없이 증폭시키는 용도로 사용할 수 있어 WDM 광통신시스템에서 중요한 역할을 할 수 있을 뿐 아니라 전광 신호처리에서도 약해진 신호 증폭에 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 또한 빠른 반응으로 광신호처리에서의 중요한 교환소자, 파장변환소자로서 사용될 수 있다.

〈그림 1〉은 양자점 SOA의 구조와 사용 방법

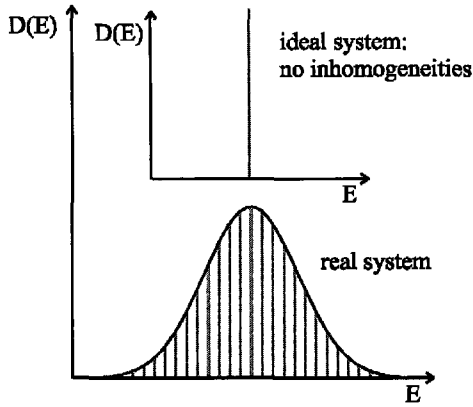


〈그림 1〉 양자점 반도체광증폭기의 사용 예

을 간단히 보여주는 그림으로 기존의 SOA에서 이득 매질을 반도체 양자점으로 치환한 구조로 많은 부분 기존에 개발된 제작 공정을 사용할 수 있다. 모든 방향으로 크기가 약 10nm 정도인 영차원 양자구조를 이용하여 기존 SOA의 문제점을 해결하면서도 성능이 더욱 우수한 광증폭기를 만들 수 있다. 이러한 장점들은 영차원 구조인 양자점에서는 에너지 레벨이 불연속적이고 주변의 양자점과 연관이 없어 양자점 SOA의 이득이 파장별로 독립적인 전형적인 inhomogeneous 이득특성을 가지게 된다는 점에서 기인한다. 또한 모든 방향으로 전자가 제한되어 있어 편광의존도가 없으며 상태밀도가 불연속적이어서 이득특성이 우수하여 효율이 높으며 빠른 동특성을 가지고 있어 40Gb/s 이상의 빠른 신호에서도 우수한 증폭 특성을 보일 것으로 예상하고 있다. 제2장에서는 양자점 SOA가 우수한 특성을 보일 수 있는 원리에 대하여 간단히 기술하고 대표적인 응용 가능성을 살펴보고자 한다. 제3장에서는 양자점 SOA와 관련된 국내외 연구동향을 살펴보고 결론 부분에서 이를 간단히 요약하고자 한다.

II. 원리 및 응용

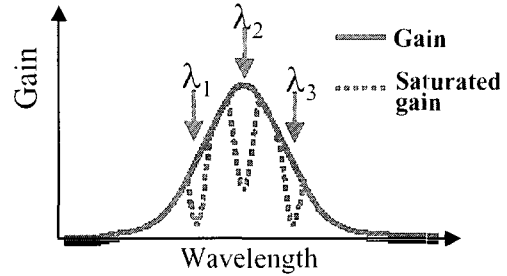
양자점 SOA는 모든 방향으로 길이가 약 10nm 정도인 반도체 구조를 이용한다. 진공 중에서 양자 효과를 보기 위해서는 0.1nm 보다 작아져야 하지만 반도체 내에서는 10배 이상되는 유전율과 0.1배보다 작은 유효 전자 질량으로 그 크



〈그림 2〉 양자점에서의 상태밀도

기가 10 nm 이상이 되더라도 양자효과가 크게 나타나게 된다. 격자 상수가 다른 두가지 결정을 MBE나 MOCVD 방법으로 박막 성장하게 되면 스트레인으로 인해 10 nm 크기의 섬 모양을 스스로 형성하며 이 위에 다시 원래의 에너지 갭이 더 높은 물질을 성장시키면 모든 방향으로 전자가 제한되는 양자점 구조가 되며 이 때 영차원 양자구조의 특성이 강하게 나타나게 된다. 영차원 양자구조의 경우 원자와 비슷하게 에너지 준위가 불연속적으로 나타나게 되는데 이를 나타낸 것이 〈그림 2〉의 상부에 나타나 있다. 양자점의 개수가 무수히 많은데 이상적으로 모든 양자점의 크기가 균일하다면 상부 그림에서와 같이 상태밀도가 델타함수와 같이 한 파장에만 몰려있게 될 것이다. 그러나, 실제의 경우 크기가 불균일하기 때문에 많은 양자점에서의 상태밀도는 〈그림 2〉의 하부와 같이 나타나게 된다^[1].

이 경우 양자점 SOA의 이득은 파장별로 독립적인 전형적인 inhomogeneous 이득 특성을 가지게 되고 채널간 이득 간섭이 없을 것으로 예상된다. inhomogeneous 이득 특성을 가지게 되면 여러 파장의 신호가 동시에 들어오더라도 〈그림 3〉과 같이 각 파장에서 spectral hole burning 현상이 일어나고 다른 파장 신호의 이득에는 영향을 주지 않아 채널간 신호 간섭이 없게되어 WDM 광통신에서 사용할 수 있다. 또한 모든 방향으로 비슷한 조건으로 전자가 제한되어 있어



〈그림 3〉 양자점 광증폭기의 이득 포화 특성

〈표 1〉 QD vs QW SOA

	QW SOA	QD SOA	원 리
Cross-talk	심각	없음	inhomogeneous broadening
편광특성	해결어려움	무편광	3-dim. confinement
고속 작동	어려움 ~1ns(왜곡)	가능 >40Gb/s	fast gain recovery
다채널 동작	어려움	문제 없음	inhomogeneous broadening

편광의존도가 없어지며 상태밀도가 불연속적이어서 이득특성이 우수하여 효율이 높다. 불연속적인 에너지 레벨의 특성으로 이득의 회복시간이 아주 빠른 동특성을 가지고 있어 40Gb/s 이상의 빠른 신호에서도 문제없이 좋은 증폭 특성을 보여줄 것으로 예상된다. 이러한 특성의 양자점 SOA가 여러개 연결된 장거리 전송시스템이나 메트로용 WDM 네트워크에서 사용하는 경우 능동적으로 조절하지 않고도 자동으로 이득 평탄, 이득 고정, 출력 고정의 기능을 보여 시스템에서 요구하는 모든 기능을 가진 광증폭기의 특성을 가지게 된다.

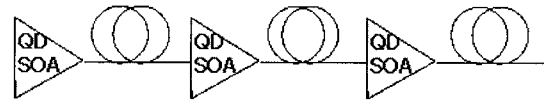
양자점 SOA와 기존의 SOA를 〈표 1〉에 비교하였다. 여러 가지 응용에서 요구하는 특성을 기존의 SOA와는 달리 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

이러한 면을 살펴볼 때 양자점 SOA가 상품화하게 된다면 기존의 소자를 경제적이고 우수한 특성을 가진 양자점 소자로 대체할 수 있을 것이며 또한 기존의 소자가 가지지 못하였던 신기능

으로 광통신시스템을 비롯하여 많은 분야에 크게 기여할 수 있을 것이다. 또한, 양자점 SOA의 개발이 성공하면 비슷한 특성으로 장점을 가지는 QD LD의 개발을 쉽게 할 수 있어 다른 양자점 소자의 개발에도 큰 기여를 할 것을 기대한다. 양자점 SOA는 광통신에의 응용이외에도 앞으로 중요해질지 모르는 광 컴퓨터에서도 출력고정의 기능을 가지고 단계마다 생길 수 있는 손실을 보상해주는 기능을 해줄 수 있을 것이다. 광증폭 기능외에도 이득포화 영역을 이용하여 광신호처리에서도 월등한 특성을 보일 것으로 예상된다. 예를 들면 잡음이 많아진 약한 신호를 비선형적 이득 특성을 이용하여 다시 깨끗한 신호로 만들 수 있다. 기존의 SOA와 비교해서 포화이득 영역에서 비선형성이 더욱 강하기 때문에 특성이 좋고 기존 SOA의 단점이었던 채널간 간섭이 없어 다 채널로 신호처리를 할 수 있다.

구체적인 예로서 다채널 2R 재생을 들 수 있다. 신호가 약해지고 왜곡이 생긴 경우 광증폭기를 이용하게 되면 신호의 크기는 증가하더라도 왜곡된 신호는 다시 깨끗한 신호로 바뀌지 않아 더 장거리를 가게 되면 에러의 가능성이 점점 커지게 된다. 이 경우 포화흡수체를 사용하여 0에 해당하는 약한 신호는 제거하고 통과한 1에 해당하는 상대적으로 강한 신호는 광증폭기를 포화시켜 1 부분의 잡음을 제거할 수 있는데 이 경우 양자점 SOA를 사용하게 되면 inhomogeneous broadening의 특성으로 포화 특성이 더 강하게 나타난다. 더욱이 파장이 다른 채널간에 간섭을 일으키지 않아 WDM 시스템에서 다파장 2R 재생을 할 수 있어 경비면에서도 월등한 이점을 가지게 된다. 또한 기존의 SOA와는 달리 40 Gb/s 이상의 초고속 동작이 가능하여 앞으로의 40 Gb/s 시대에 더욱 강점을 발휘할 것으로 보인다.

또 다른 구체적인 예로서 WDM 광통신 시스템용에서 광증계기로 사용할 수 있다. 현재 사용하는 광증계기는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기로 크기도 크고 가격도 높다. 또한 파장에 따른 이득의 차이가 커서 여러 개의 광증폭기를 통과해야 하는 장거리 전송 시스템에서는 이 문제가 심각



〈그림 4〉 양자점 SOA를 광증계기로 사용한 새로운 WDM 광전송 시스템

해지며 이를 해결하기 위한 방법들이 활발히 연구되고 있다. 이득 불균형 문제를 해결한다 하더라도 앞으로의 WDM 네트워크 시스템에서 사용할 일부 채널의 첨가/탈락 기능으로 입력신호의 큰 변화가 생기고 이로 인해 광증폭기의 이득이 급히 변하는 심각한 문제가 생기게 된다. 이를 해결하기 위하여 계속 연구중이나 완벽한 해결이 아직 되지 않고 있는 상황이다.

〈그림 4〉에 나타낸 바와 같이 광증계기로 양자점 SOA를 사용하게 되면 앞에서 언급한 문제점들을 모두 해결할 수 있다. 여러개의 광증폭기를 지나면서 이득 차이가 커지는 문제는 inhomogeneous broadening 특성의 광증폭기에서 일어나지 않으며 다른 채널에서 신호의 있고 없음이 측정 채널의 이득에 영향을 주지 않아 채널의 첨가/탈락에서도 이득이 급변하는 문제가 없게 된다. 통신용량의 증가로 더 넓은 이득 대역이 필요하게 되면 에르븀 첨가 광섬유 증폭기가 1510-1620 nm로 이득이 제한되는 데 반해 어느 영역이든 반도체의 에너지 갭을 쉽게 조절하여 원하는 영역에서 좋은 이득을 주는 광증폭기를 제공할 수 있는 장점도 있으며 반도체 광증폭기이기에 대량 공급의 경우 에르븀 첨가 광섬유 증폭기에 비해 가격이 월등하게 유리하다.

IV. 국내외 연구 현황

연구가 활발한 양자점 laser diode(LD)에 비해 양자점 SOA에 대한 연구는 아직까지 많이 진행되지 않았다. 그러나 그 중요성으로 인해 지난 일어난 내에 이에 대한 연구 결과가 발표되기 시작하였고 광통신 학계에서 특별한 관심을 끌

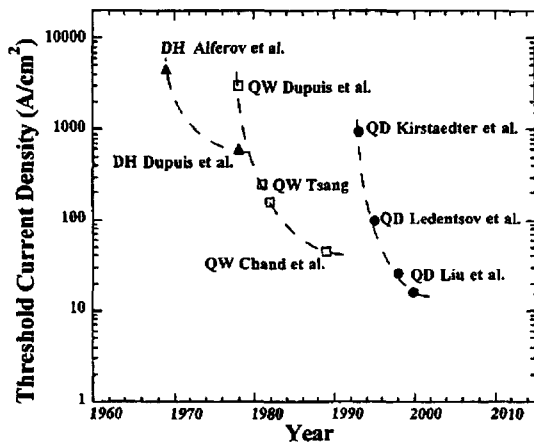
고 있다. 2002년 9월에 있었던 유럽 광통신학회 (ECOC)에서 처음으로 1.5um 대역 양자점 SOA 연구 결과가 post-deadline 논문으로 발표되어 그 후의 많은 관련학회에서 초청 강연을 하고 있다.

밀접한 관련이 있는 양자점 LD에 대한 연구가 지난 수년간 활발하여 이미 양자점 우물을 이용한 LD의 성능보다 좋을 수 있음이 여러 가지 발표되고 있다. 이 분야에서는 독일 베를린 공과대학의 Bimberg와 러시아의 Alferov의 공동그룹, 미국 텍사스 대학의 Deppe 그룹, 뉴멕시코 대학의 Lester 그룹, 그리고 독일의 Wuerzburg 대학의 Forchel 그룹이 가장 앞서가고 있다. 특히 뉴멕시코 대학의 Lester 그룹에서 가장 낮은 10 A/cm²의 기록을 가지고 있으며 이러한 연구 결과를 바탕으로 Zia Laser라는 벤처회사를 창업하여 양자점을 이용한 1.3um DFB 레이저 다이오드를 개발하여 최근 이를 상품화 하였다. <그림 5>는 LD의 임계 전류값의 시간에 따른 변화로 이미 양자점 LD에서 가장 우수한 값이 나오는 것을 알 수 있으며 시간에 따라 개선되는 정도도 벌크나 양자우물구조 LD에 비해 급하게 변하고 있는 것을 알 수 있다.

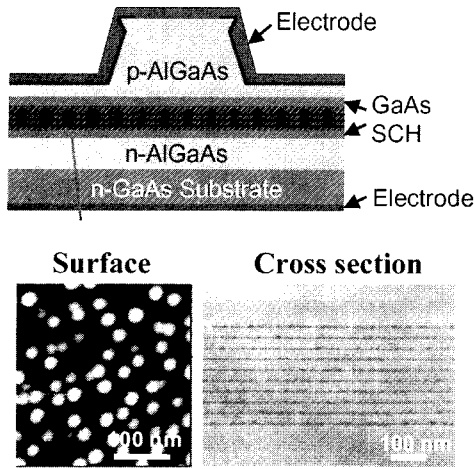
양자점 LD의 연구 결과로부터 양자점 SOA에서의 특성을 예상할 수 있는 부분이 많다. 양자점 LD의 경우 전자가 양자점에 갇혀 있어 고출

력 레이저에 유리하다. 독일 베를린 공과대학의 Bimberg/Alferov 그룹이 이 분야에서 독보적인 결과를 내고 있다. 실온에서 1.3um에서 2.7W, 1140nm에서 3.7W를 내고 내부효율이 92%되는 양자점 레이저 다이오드를 발표하였다^[2]. 독일의 Wuerzburg 대학은 고기능의 양자점 레이저 다이오드를 여러 가지 발표하였다. 선편이 협소한 양자점 DFB 레이저 다이오드를 제작하고 심지어 213도에서도 우수한 성능을 보임을 보여주었으며 온도 증가에 따른 파장 변화도 기존의 소자에 비해 작고 side mode suppression 비도 50 dB가 넘음을 보여 주었다. 양자점 레이저 다이오드의 경우 양자점의 특성으로 직접 변조시에 선편이 넓어지지 않아 초고속 직접 변조가 가능하다. 이러한 결과는 뉴멕시코 대학의 Lester 그룹에서 측정하여 알파파라미터가 0.1보다 작은 우수한 특성을 보임을 밝혔고^[3] 일본 NEC의 Saito의 비교결과에 의하면 양자우물구조의 레이저는 선편이 급격히 증가하지만 양자점의 경우는 선편 증가를 전혀 관찰할 수 없었다. 덴마크 공대의 Borri는 양자점 레이저 다이오드 혹은 양자점 광증폭기의 경우 얼마나 빨리 유도방출에 의해 비워진 기저상태가 채워지는가를 측정한 결과 약 100 펨토(10-15)초라는 빠른 시간내에 다시 채워짐을 발견하여 QD SOA에서 초고속 동작이 가능함을 보여주었다^[4].

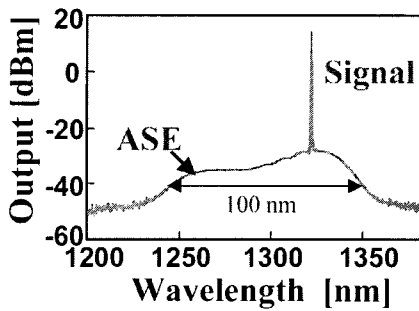
양자점 SOA에 대한 연구는 일본의 Fujitsu사가 가장 먼저 연구 결과를 발표하였다^[5]. GaAs 기판에 InAs 양자점을 이용하여 1.3um 대역에서 양자점 SOA를 제작하여 Four-wave mixing (FWM) 현상을 이용한 파장변환에 대한 연구를 활발히 하고 있다. 실험 결과 알파파라미터가 작아 대칭적인 FWM 신호를 가짐을 보여주었다. <그림 6>은 Fujitsu의 양자점 SOA의 구조를 보여주고 있다. 양자점 활성층을 제외한 다른 부분은 기존의 SOA 구조와 비슷하며 10 주기의 InAs 양자점층을 활성층으로 하였다. <그림 7>은 이러한 양자점 SOA를 이용한 광증폭 스펙트럼을 보여주고 있다. 상용 SOA 제품이 약 10 dBm의 출력을 가지는 것과 비교하면 증폭된 신호의 크



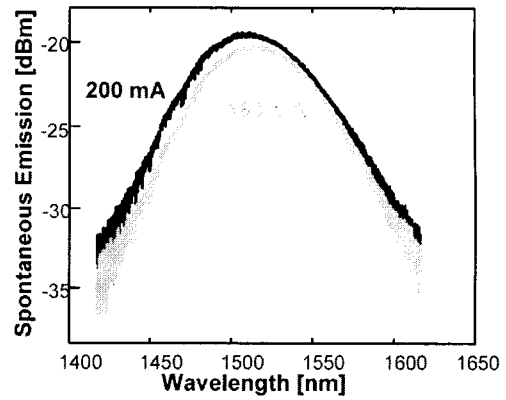
<그림 5> LD의 임계 전류값의 시간에 따른 변화



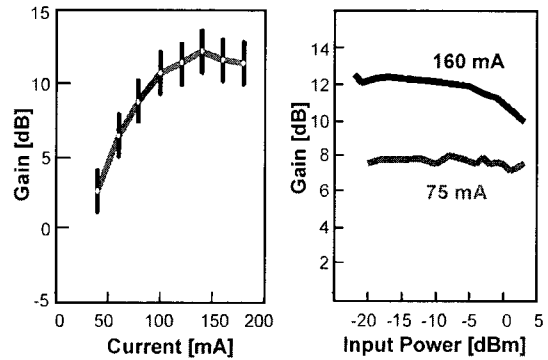
〈그림 6〉 Fujitsu사의 1.3um 양자점 SOA의 구조



〈그림 7〉 〈그림 6〉의 양자점 SOA를 이용한 광증폭 스펙트럼



〈그림 8〉 InP 기판위의 양자점 SOA에서의 이득 스펙트럼



〈그림 9〉 전류와 입력 신호세기에 따른 〈그림 8〉의 양자점 SOA의 이득 변화

기가 15 dBm를 넘어 양자점 SOA의 출력이 이미 상당함을 알 수 있다.

양자점 SOA는 WDM 광통신 시스템에서 그 우수성을 가장 잘 보여줄 수 있는데 이 경우 파장대역은 1.5um 대역이어야 한다. 비교적 잘 연구된 GaAs 기판위의 InAs 양자점은 1.3um 까지만 비교적 좋은 특성을 보이기에 이 파장 대역을 위해서는 InP를 기판으로 하는 양자점을 이용하여야 한다. 그러나, InP 계열 양자점에 대한 연구는 극히 초기여서 LD 발진을 성공시킨 경우도 전세계에서 3군데 이내로 알려져 있다. MBE 방법으로 길러진 이 경우도 양자점이라기 보다는 양자 dash 구조로 알려져 있어 구체적으로 양자점의 특성을 충분히 가지고 있는지는 아직 의문이다^[6]. 2002년 후반에 이스라엘의 Technion

대학이 Wuerzburg 대학과 공동으로 1.5um 대역에서 양자점 SOA 연구 결과를 발표하였다^[7]. 〈그림 8〉은 이러한 양자점 SOA에서의 이득 스펙트럼을 나타내는 그림으로 1.5um 근처에 이득 극대치가 있음을 알 수 있다. 〈그림 9〉는 전류와 입력 신호세기에 따른 이득의 변화를 보여주는데 최고 12dB의 이득을 가짐을 알 수 있다. 이 실험 결과에서도 FWM 특성을 조사하여 알파파라미터가 작음을 보여 주었다. 이러한 연구는 유럽연합의 공동 연구과제인 “BigBand”라는 양자점 SOA 연구과제로 2002년부터 하나의 주제로 약 30억원을 투자하여 연구하고 있어 빠른 연구 성과를 얻으리라 예상된다.

국내에서의 QD SOA의 활성층이 되는 양자점 관련 연구개발은 KIST, 표준연, 서울대, 성균관

대, KAIST, 충남대, 삼성전자 등에서 MBE, MOCVD 방법에 의한 양자점 형성 및 제어, 평가, 소자응용 기술 등 관련 연구를 자체적으로 수행해 왔다. 1999년부터 과기부 중점국가과제 극미세 구조기술 개발사업의 일부로 KIST 그룹에서 양자점의 성장에 대한 연구가 진행되고 있으며 표준연구원에서도 양자점 성장과 특성에 대한 연구를 자체적으로 진행하였다. KAIST와 삼성종합연구소에서 양자점 적외선검출기를 개발하기 위한 연구가 진행되었다가 중지되었으나 2001년 말부터 본격적으로 양자구조 적외선 검출기 연구과제를 KIST, 표준연구원, KAIST가 공동으로 연구를 진행하고 있다. 서울대에서는 MOCVD를 이용하여 정밀한 양자점 성장법을 개발하였고 양자점 형성의 구체적인 구조를 밝혔다. 2002년부터 전자통신연구원에서 장거리 전송용 40Gb/s 직접변조 양자점 DFB LD의 연구를 시작하여 2002년부터 본격적으로 양자점 광소자에 대한 연구가 시작되었다고 할 수 있다.

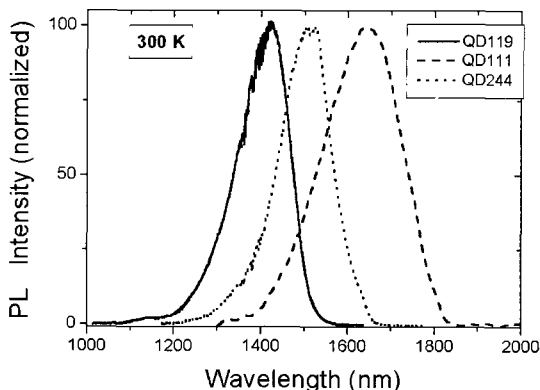
성균관대학에서 InP를 기판으로 하는 양자점 성장을 자체적으로 시도하여 세계적으로 우수한 1.5 μm 대역 양자점 구조를 발표하였고 이 대역에서의 양자점 레이저에 대한 연구를 진행하고 있다. 충남대에서는 여러 기관과 협력하여 양자점의 특성을 이해하고 이를 여러 가지 양자점소자에 적용하기 위한 시도를 해왔다. 이러한 연구

를 기반으로 새로운 나노 시스템인 양자점에 대한 근본적인 이해를 가지고 양자점 SOA 설계와 특성에 대해 충분히 예상할 수 있으며 어떤 파라미터가 설계에 꼭 필요한가를 알 수 있어 QD SOA의 최적화에 유리한 위치에 있다. <그림 10>은 성균관대학에서 발표한 InP 기판위의 InAs 양자점이 실온에서 1.4~1.6 μm 대역에서 좋은 특성을 가지고 파장 조절이 용이함을 보여준 결과이다^[8,9]. 국내에서도 1.5 μm 대역에서 우수한 결과를 가지고 있어 이 대역에서 좋은 특성을 가지는 QD LD 나아가서는 QD SOA를 개발할 수 있을 것이라고 생각한다.

V. 결 론

반도체의 대표적인 나노 구조인 양자점은 영차원 양자구조의 특성인 불연속적인 에너지 레벨로 인해 기존의 소자가 보여줄 수 없었던 중요한 특성을 가지고 있으며 이를 이용하여 신기능의 양자점 SOA를 기대할 수 있어 이에 대한 연구가 최근 들어 큰 관심을 끌고 있다. 국내에서도 나노 핵심기술과제의 일환으로 본격적으로 양자점 SOA 연구를 시작하였다. 수년 후에는 앞에서 기술하였던 신기능의 광증폭소자가 1.5 μm 대역에서 중요한 역할을 할 것으로 기대한다.

그러나 양자점은 지금까지 연구하였던 다른 양자구조와는 판이하게 다르다. 이로 인해 양자우물구조나 양자선 구조에서 습득한 정보를 그대로 사용할 수 없으며 현재까지 양자점 시스템을 이해하기 위해 많은 노력을 해 왔지만 아직까지 충분히 이해하지 못하고 있다. 최적의 양자점 소자 설계를 위해서는 좀 더 근본적인 양자점 자체에 대한 연구도 병행해야 할 것이다. 또한, 설계에 필요한 파라미터들이 완전히 밝혀진 것이 아니기 때문에 이를 알아내기 위한 연구도 소자 제작 연구와 더불어 꼭 필요하다. 이러한 새로운 양자구조를 이용한 소자에 대한 연구는 물리학, 재료공학, 그리고 전자공학 분야의 전문가들이 서로 긴



<그림 10> InP 기판위의 InAs 양자점의 실온 PL 스펙트럼

밀한 협조를 해야만 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 말

본 양자점 SOA 과제는 과학기술부의 나노핵심기술과제에 의해 수행되고 있습니다. 본 연구에 핵심적인 역할을 맡은 정원국 교수, 중요한 역할을 한 이욱현 박사께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] U. H. Lee et al., "Optical characteristics of self-assembled InAs/GaAs quantum dots at various temperatures and excitations", J. Kor. Phys. Soc., 37, 593 (2000. 11)
- [2] A. E. Zhukov et al., "3.9W cw power from sub-monolayer quantum dot diode laser", Electron. Lett., 35, 1845 (1999 10)
- [3] T. C. Newell et al., "Gain and linewidth enhancement factor in InAs quantum dot laser diodes", IEEE Photon. Technol. Lett., 11, 1527 (1999. 12)
- [4] P. Bori et al., "Ultrafast carrier dynamics and dephasing in InAs quantum dot amplifiers emitting near 1.3 um wavelength at room temperature", Appl. Phys. Lett., 79, 2633 (2001. 10)
- [5] T. Akiyama et al., "Symmetric highly efficient (~0 dB) wavelength conversion based on four-wave mixing in quantum dot optical amplifier", IEEE Photon. Technol. Lett., 14, 1139 (2002. 8)
- [6] R. H. Wang et al., "Room temperature operation of InAs quantum dash lasers on InP (001)", IEEE Photon. Technol. Lett., 13, 767 (2001. 8)
- [7] R. Alizon et al., "Linear and non-linear characteristics of InAs/InP quantum dash optical amplifiers at 1550 nm", ECOC'02, Copenhagen, Sept. 8-12, Post deadline paper PD3.9 (2002. 9)
- [8] W. G. Jeong, P. D. Dapkus, U. H. Lee, J. S. Yim, D. Lee, and B. T. Lee, "Epitaxial growth and optical characterization of InAs/InGaAsP/InP self-assembled quantum dots", Appl. Phys. Lett., 78, 1171 (2001. 2)
- [9] U. H. Lee, J. S. Yim, D. Lee, W. G. Jeong, E. H. Hwang, D. Y. Rhee, J. S. Sim, P. D. Dapkus, and B. T. Lee, "Optical characteristics of InAs/InGaAsP/InP self-assembled quantum dots emitting at 1.4~1.6um", Jpn. J. Appl. Phys. 41, 524 (2002. 2)

저 자 소 개



李 東 翰

1982년 2월 서울대학교 물리학과 학사, 1984년 2월 서울대학교 물리학과 이학석사, 1989년 5월 브라운대학교 물리학과 이학박사, 1989년 6월~1992년 11월 : AT&T 벨연구소 연구원, 1992년 12월~현재 : 충남대 물리학과 교수, <주관심 분야 : 반도체 양자구조, 광증폭 시스템>