

1. 서문

레이저(laser)란 말은 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (유도 방출에 의한 광증폭)의 머리글자를 모은 것이다. 최초의 레이저는 1960년 T.H. Maiman 에 의해 발명된 루비레이저이다. 1962년 초에는 W.P. Dumke가 반도체 레이저의 재료로서 갈륨비소(GaAs)가 유망하다는 발표를 하였으며 그 해 IBM의 M.I. Nathan이 반도체 레이저의 발진을 발표하였다.

반도체 레이저의 발전은 지난 40년간 비약적으로 발전하여 1970년에 갈륨알루미늄비소(GaAlAs) 반도체 레이저 실은 연속 발진이 보고된 이래 오늘날 반도체 레이저는 일상 생활에 다루어지는 응용의 많은 분야에

반도체 레이저의 방출 빛은 전자가 가전대로부터 전도대까지 올라 간다면 매우 짧은 시간 후에 전도대의 전자는 그 대역의 가장 낮은 준위로 떨어지고, 가전대 꼭대기에 있는 어떤 전자도 역시 가장 낮은, 점유되지 않는 준위로 떨어진다. 그래서, 가전대 꼭대기에서 '호울' 만이 남게 된다. 이것은 가전대와 전도대 사이에 상태밀도 반전이 있다는 것을 의미 한다. 전도대의 전자는 가전대로 되돌아가 전자와 호울이 재결합하게 된다. 이 과정에서 광자를 방출한다. 따라서 빛의 파장은 대부분의 경우 반도체의 가전대의 꼭대기와 전도대의 바닥 사이의 밴드갭에 의해 결정된다.

예를 들면 화합물 반도체인 갈륨인듐인(GaInP)인 경우 약 1.9 eV 이다. 이 경우에는 빨간색 파장의 빛을 방출하게 된다. '밴드갭' 이것은 반도체 레이저에 있

특집 | 나노포토닉스

양자점 레이저(Quantum-Dot Lasers)

김길호*

있어서 핵심적인 요소로 자리잡게 되었다. 광섬유 통신, 비디오 광디스크 및 레이저 인쇄기 등 이들 요소는 잘 알려진 예가 될 것이다. 이것은 세계 많은 국가들에 의해 새로운 파장 영역에서 더욱 작게, 더욱 밝게, 더 좋은 효율 및 기능을 만들기 위해 연구되고 있다. 이러한 새로운 등급의 반도체 레이저의 기술적 요구는 자연스럽게 일어나고 있으며 이것을 충족하는 기술의 하나로 자발형성에 의한 양자점 레이저(Quantum-Dot Laser)는 광통신 및 광정보 처리의 발광원으로 사용되는 CD(compact-disc) 또는 DVD(dissociated vertical deviation) 플레이어와 같은 많은 영역에서 응용될 것임을 약속할 것이다.

2. 반도체 양자점 레이저 원리

어 전자파가 크리스탈 속으로 움직여 가는 양자현상 때문에 가장 유용한 특성으로 반응하게 된다. 내부 밴드갭의 에너지로부터 전자의 양자역학적 금지대를 갖게 된다. 실리콘(Si), 갈륨비소(GaAs)와 같은 일반적(bulk)인 반도체에서는 전도대의 전자들은 자유전자와 같은 행동을 하게 되며 운동량과 에너지의 값이 연속적인 점유상태라 할 수 있다.

만약 반도체의 상태가 극한적으로 작아진다고 가정 을 하게 되면 전자들은 아주 작은 공간에 가두어 지게 된다. 바꾸어 말하면 몇 개의 전자가 작은 공간을 점유 한다면 원자와 마찬가지로 전자는 파울리 배타원리를 따라 몇 개의 전자 서로간의 분리된 껍을 갖게 된다는 것을 의미하게 된다. 따라서 몇 개의 전자가 충분히 작은 공간에 가두어 진다는 의미는 물리적으로 전자 하나하나가 원자에서의 에너지 준위와 마찬가지로 에너지 준위는 양자화 될 것이다. 화합물 반도체에서 인공

* 성균관대학교 정보통신 공학부

양자점 레이저 (Quantum-Dot Lasers)

원자를 만드는 방법은 다음과 같다. 어떤 큰 밴드갭을 가진 반도체 물질의 주위에 밴드갭이 작은 물질이 존재한다면 이것을 양자점(quantum dot)이라 하며 다른 이름으로는 인공원자 또는 0 차원(dot)[참고 3차원:벌크(bulk), 2차원:우물(well), 1차원:선(wire)]이라고 한다. 벌크에서의 반도체 레이저 동작원리와 양자점 반도체 레이저 동작 원리의 비교는 그림 1(a)와 (b)에서와 같이 같은 물질 이라도 밴드갭의 차이가 나타나므로 기존에서 나타나지 않는 새로운 영역에서의 파장을 만들어 낼 수 있음을 시사한다.

그림 1(a) 벌크 반도체 물질에서의 주기적인 크리스탈 포텐셜은 전자들은 금지된 밴드갭에 의해 분리된 에너지 밴드의 결과로서 거의 자유운동을 하게 된다. 전도대 안에서 전자들은 운동에너지와 운동량은 연속성을 가지고 있다. (b) 매우 작은 반도체 조각에서 제한된 공간에서의 전자 전적으로 다른 상태가 되며 에너지 스펙트럼은 원자와 같이 분리되어 나타나게 된다.

3. 양자점 성장 기술 및 분석

자발형성 양자점 레이저의 제작하기 위한 핵심적인

기술의 하나는 양질로 성장된 웨이퍼가 있어야 하며 이는 기판 위에 이중 이종접합구조를 성장을 하는 방법으로 이를 에피탁시(epitaxy; 결정성장)라 한다. 현재 결정 성장에 주로 사용되는 방법은 분자선 결정 성장법(MBE: Molecular Beam Epitaxy) 및 유기금속 기상성장법(MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition)이 있다. 에피탁시 성장법으로 자발형성 양자점을 형성하는데 있어 기본적으로 이중 물질의 격자 부정합으로 인해 화합물의 결합할 때 스스로 스트레인을 줄이기 위하여 엉겨 붙어 자발형성 양자점을 구성하게 되는데 GaAs/InAs, InP/GaP, GaN/AlN, SiGe/Si 등 다양한 화합물 반도체에 대하여 초미세구조를 자연반응의 자발형성 성장 기법으로 제작이 가능하게 되었다. 이러한 격자 부정합 성장법을 Stranski-Krastanov 성장법이라고 한다. 성장된 자발형성 양자점의 형성 구조 및 물질의 특성을 이해 함으로 성공적인 소자의 개발에 필요한 성장 기술의 발전은 수 10 nm 크기의 양자점이 가능하게 된다.

양질의 자발형성 양자점을 형성하는 기술에 따라 레이저의 발진 및 특성이 결정된다고 해도 과언이 아닐 정도로 성장 기술은 매우 중요한 역할을 차지한다.

양질의 성장에 있어서 여러 가지 기술이 병행 되어 분석하므로 성장 상태를 피드백하여 반도체 양자점 레

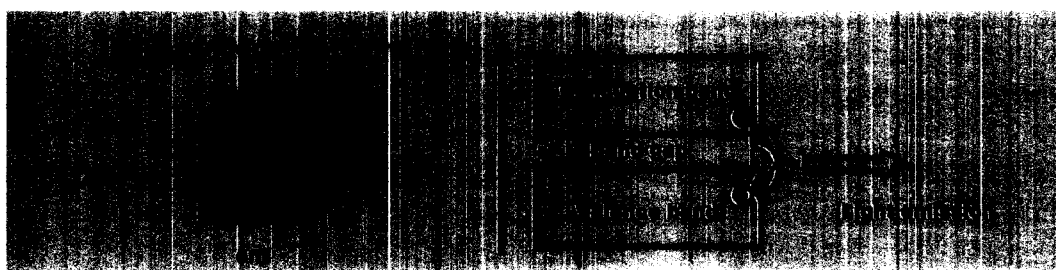


그림 1. a

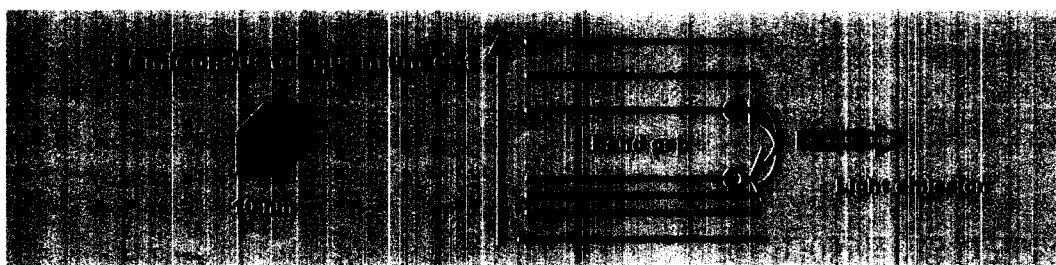


그림 1. b

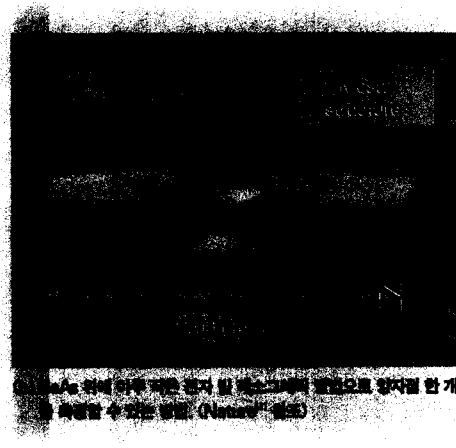
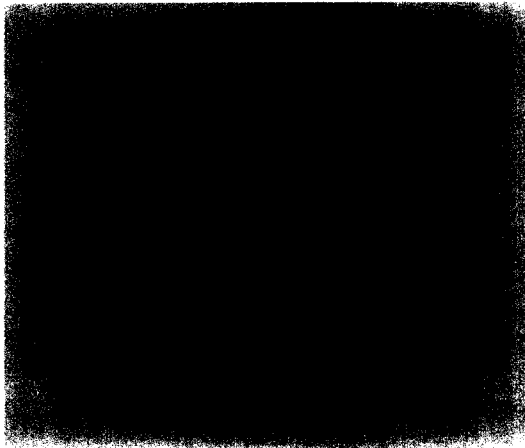
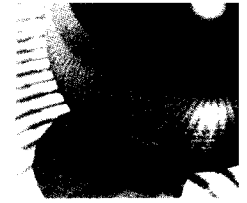


그림 2

이저를 만들기 위한 양질의 웨이프를 생산 할 수 있을 것이다. 이는 세 종류로 분석 방법으로 분류할 수 있다.

1) 영상 분석: 방법으로 원자 단위의 작은 영역까지 볼 수 있는 현미경으로 성장된 상태를 알 수 있을 것이다. 현재의 경우 다음 방법으로 성장된 상태를 경우에 따른 방법으로 현미경으로 직접 눈으로 관찰하는 방법으로 분석 할 수 있을 것이다. 주사터널링 현미경 (STM: Scanning Tunneling Microscopy), 투과전자 현미경(TEM: Transmission Electron Microscope), 주사 투과 전자 현미경 (STEM: Scanning Transmission Electron Microscope), 원자력 현미경 (AFM: Atomic Force Microscopy).

2) 전기적 분석: 전기적 측정을 통하여 전자의 밀도 및 이동도를 계산하므로 반도체 내부의 전자의 상태 및 계면간의 상태 및 산란 상태를 조사하므로 웨이프의 상태를 조절하고 도핑의 농도의 변화 및 스페이스의 두께 등 소자의 적층을 설계 할 수 있다.

3) 광분석: wafer의 특성을 조사 하는데 있어 간단한 실온에서의 광루미네선스 측정에서 극저온 및 고자 기장에서 하나의 양자점의 특성 조사에 이르기 까지 광범위 하게 적용될 수 있는 분석 방법으로 웨이프의 특성을 조사 할 수 있을 것이다. 그림 2는 광 분석중 단일 양자점을 분석하는 기술로 전자 빔 리소그래픽 방법으로 하나를 선택적으로 광루미네선스를 측정 하므로 단일 양자점의 특성을 조사할 수 있을 것이다. 양자점 전체의 방출 스펙트라의 측정 결과는 그림 3과

같이 나타낼 수 있다.

이들의 분석 기술은 나노 기술과 관련된 분석 기술로 나노 기술을 이해하고 발전되는데 반도체 기술과 더불어 원천기술을 발전 시키는 역할을 할 것이다.

4. 양자점 레이저 응용

아주 간단한 모델의 예로서 사각의 우물을 생각할 수 있다. 이 모델에서 분리된 에너지 준위는 역으로 양자점의 크기에 관련이 된다. 이론적으로 실온에서는 양자우물의 에너지준위에 대하여 양자점의 크기가 10 nm 크기나 그보다 작아야 열에너지로부터 안전하게 전자의 에너지 분리가 일어 난다는 것이다. 하지만 이 보다 큰 양자점에서 실온에서 좋은 레이저 동작특성을 가지고 있으며 이는 유효 포텐셜에 의한 반응이라고 하며 이와 같은 양자점들은 오직 수천 개의 원자들만 포함되며 밴드갭의 에너지보다 양자점안의 에너지 준위에 의해 방출되는 빛의 파장은 결정 될 것이다.

III-V족 화합물 반도체 양자점을 사용하는 소자중 가장 활발하게 연구되고 있는 분야는 양자점을 활성층으로 사용하는 레이저에 관한 연구이다. 이는 양자점이 갖는 원자와 같은 구속 상태 에너지 레벨과 델타함수형의 상태밀도 때문에 이를 이용하는 레이저의 경우 고이득, 고미분이득, 온도에 둔감한 낮은 문턱전류밀도를 실현할 수 있기 때문이다. 비록 장거리통신에 사

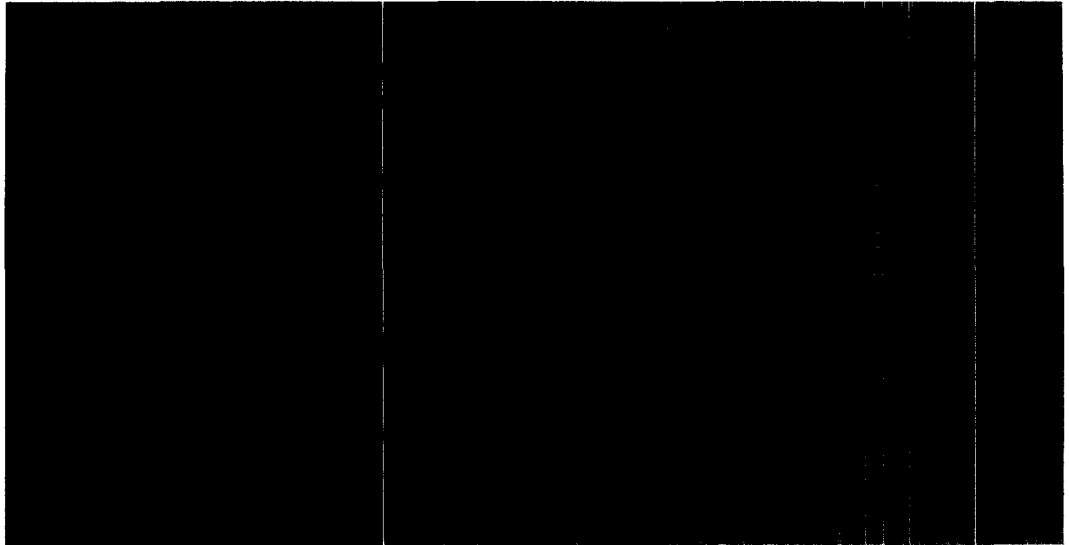


그림 3. 왼쪽의 그림은 점(dot) 에너지 준위의 도식이며 오른쪽은 방출 스펙트럼 결과이다. (Nature¹¹⁾ 참조)

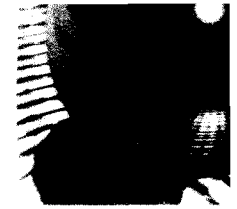
용되는 1.55 μm 파장대가 여전히 높은 관심을 갖고 연구되고 있긴 하지만 단거리통신용인 1.3 μm 파장대에서 신뢰할 수 있는 발수광소자에 대한 관심이 높다. 1.3 μm 파장대에서의 활성층은 기존의 이러한 파장대의 소자를 제작할 수 있는 InP 계열보다 온도 특성이 좋은 GaAs 기판상에서 실현하려는 움직임이 있으며, 이러한 경우 그 활성층은 InGaAsN 물질이나 In(Ga)As 양자점이며 최근의 연구결과 1.3 μm 파장대에서 양자점을 사용하는 매우 낮은 문턱전류 밀도를 갖는 레이저 및 고출력 레이저등이 발표되고 있어 향후 균일한 양자점 성장기법 등의 발전과 함께 이론적으로 예측되었던 양자점 레이저의 효용성이 실현될 것이다.

이러한 인공원자와 같은 최초의²⁾ 자발형성 양자점 레이저이래 많은 우수한 특성의 자발형성 양자점이 발표되면서부터 시도되어 1999년 후반부터는 좋은 결과들이 계속 보고되고 있다. 특히 양자점 초기부터 활발히 연구를 해온 독일의 Bimberg/러시아의 Alferov^{3,5)} 그룹에서 양자우물구조의 레이저보다 더 낮은 문턱 전류, 3.5 W의 고출력 양자점 레이저 등 좋은 결과들을 계속 발표하고 있으며, 특히 GaAs기판 위에 성장된 자발 형성 InAs 양자점의 제작에 최근 많은 관심을 보이고 있다. 이물질의 포텐셜이 1.3 μm 에 가까운 파장을⁶⁾ 낼 수 있는 레이저를 만들 수 있기 때문이다. 그

러나 1.3 μm 영역에서 최적의 양자점 레이저를 만들기에는 아직도 낮은 양자점 밀도와 큰 비균질 확장으로 인하여 밴드간 흡수율이 작아지되 된다. 따라서 양질의 InAs 자발형성 다중층을 쌓으므로 근본적인 통과당 충분한 이득을 얻을 수 있기 때문이다. 미국의 Deppe^{7,9)} 그룹에서 낮은 문턱전류의 1.3 μm 영역에서 수직공동표면방출레이저(VCSEL: vertical-cavity surface-emitting lasers)를 등을 발표하였다. 실온에서 1.3 μm 에서 방출되는 파장이 최근에 선보이고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 1.15 μm 의 더욱 긴 양자점 수직공동표면방출 레이저도 보고되고 있다.¹³⁾ 양자점의 작은 이득에 대한 보상으로 양끝을 통해 방출하는 활동영역에서 양자점 레이저는 긴 공동을 가져야 하고 고반사율이 적용되어야 한다. 또한 영국의 Herrmann¹⁴⁾은 양자점 레이저의 편광에 따른 이득을 측정하여 양자점의 기저상태에서는 그 차이가 없음을 보고하였다. 이를 보면 최근 들어 양자점을 이용한 레이저가 활발히 연구되어 그 성능이 급격히 좋아지고 있으며 이에 대한 연구도 폭발적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

현재 양자점 성장기술 및 이를 이용한 양자점 소자



기술은 전세계적으로 출발단계에 있으며 이론적으로 제기된 자발형성 양자점이 원자준위와 같은 에너지상태를 갖고 있어, 기존의 벌크와는 다른 파장 영역의 만드는 것을 기반으로 한다. 또한 0 차원 구조로 인해 델타함수와 같은 상태밀도를 가짐으로 양자점을 활성층으로 하는 레이저가 고이득에 의한 낮은 문턱 전류밀도, 높은 미분이득, 운반자의 구속 및 적은 Auger process에 의한 열적 안정성을 갖는 것이 특징이지만 아직까지는 이론적으로 제기된 수준에 미치지 못하고 있으며 이 문제를 해결하기 위한 노력으로 우선 양자점의 성장 연구를 통하여 활발한 해결을 모색하고 있다. 그 중 양자점의 적층방법으로 균일한 크기의 양자점 및 양자점 밀도 성장 기술, 양자 우물에 삽입하는 방법 및 물질과 목적에 따른 레이저의 최적 성장 기술, 양자점 레이저 설계, 공정 및 분석 방법의 개발 등 다양한 문제들을 해결하므로 목적하는 반도체 양자점 레이저의 개발이 완성될 것이다.

(4) I. L. Krestnikov, W. V. Lundin, A. V. Sakharov, V. A. Semenov, A. S. Usikov, A. F. Tsatsul'nikov, and Z. I. Alferov, N. N. Ledentsov, A. Hoffmann, and D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.* 75, 1192 (1999).

(5) A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, N. A. Maleev, S. S. Mikhlin, V. M. Ustinov, A. F. Tsatsul'nikov, M. V. Maximov, B. V. Volovik, D. A. Bedarev, Yu. M. Shernyakov, P. S. Kop'ev, and Zh. I. Alferov, *Appl. Phys. Lett.* 75, 1926 (1999).

(6) For a review, see D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, *Quantum Dot Heterostructures* (Wiley, New York, 1999).

(7) D. L. Huffaker, O. Baklenov, L. A. Graham, B. G. Streetman, and D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.* 70, 2356 (1997).

(8) G. Park, O. B. Shchekin, S. Csutak, D. L. Huffaker, and D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.* 75, 3267 (1999).

(9) O. B. Shchekin and D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.* 80, 3277 (2002).

(10) J. Bloch, J. Shah, W. S. Hobson, J. Lopata, and S. N. G. Chu, *Appl. Phys. Lett.* 75, 2199 (1999).

(11) J. M. Gerard, A. Lemaître, B. Legrand, A. Ponchet, B. Gayral, and V. Thierry-Mieg, *J. Cryst. Growth* 202, 1309 (1999).

(12) M. Arzberger, U. Kasperberger, G. Böhm, and G. Abstreiter, *Appl. Phys. Lett.* 75, 3968 (1999).

(13) D. L. Huffaker, H. Deng, and D. G. Deppe, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 10, 185 (1998).

(14) E. Herrmann, P. M. Snowton, H. D. Summers, J. D. Thomson, and M. Hopkinson, *Appl. Phys. Lett.* 77, 163 (2000).

(1) M. BAYER, O. STERN, P. HAWRYLAK, S. FAFARD, and A. FORCHEL, *Nature* 405, 923 - 926 (2000)

(2) N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V. M. Ustinov, S. S. Ruvimov, M. V. Maximov, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. Gosele, and J. Heydenreich, *Electron. Lett.* 30, 1416 (1994).

(3) V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, A. Yu. Egorov, A. V. Lunev, B. V. Volovik, I. L. Krestnikov, Yu. G. Musikhin, N. A. Bert, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov, and D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.* 74, 2815 (1999).

약 령



김경호

2002. 03. - 현재 : 성균관대학교 조교수
 1999. 02. - 2002. 02. : 한국전자통신연구원 (ETRI) 선임연구원
 1998. 03. - 1999. 02. : 영국 케임브리지대학교 케빈다쉬연구소 Post-Doc
 1993. 10. - 1998. 07. : 영국 케임브리지대학교 케빈다쉬연구소 반도체물리 (나노소자) 박사
 1990. 03. - 1992. 08. : 한양대학교 레이저광학 석사
 1981. 03. - 1985. 02. : 한양대학교 물리학과 학사
 E-mail : ghk@ece.skku.ac.kr