≪연구논문≫ 한국진공학회지 제15권 5호, 2006년 9월, pp.493~498

1.5 ㎛ InGaAs/InGaAsP/InP 양자점 Superluminescent Diode의 광 특성

유영채[1,3] · 이정일[1] · 김경찬[1] · 김은규[2] · 김길호[3] · 한일기[1*]

[1]한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 서울 136-130
[2]한양대학교 물리학과, 서울 133-791
[3]성균관대학교 전자전기공학과, 수원 440-746

(논문접수일 : 2006년 2월 20일)

MOCVD로 성장된 InGaAs 양자점을 이용하여 1.5 ㎛의 발광파장을 갖는 고휘도 발광소자 (Superluminescent diode, SLD)를 제작하였다. 상온에서 SLD의 광출력은 CW 3 mW 였고, 3-dB 파장대역폭은 55 nm 이었다.

주제어 : 고휘도 발광소자, InGaAs/InGaAsP/InP 양자점, 레이저 다이오드, 광 루미네센스

Ⅰ. 서 론

Superluminescent diodes (SLD)는 기존 Fabry-Perot (F-P) 레이저 다이오드 (laser diode, LD)의 고출력 특성과 발광다이오드 (light emitting diode, LED)의 넓은 파장대역폭 특성을 동시에 갖는 반도체 광원으로써 의료영상장비인 optical coherent tomography와 광 통신 시스템의 발광소자로서 응용 가능하다. SLD가 넓은 파장대역폭 특성을 갖기 위해서는 F-P 공진 모드를 억제하여야 하는데 이를 위해서는 보통의 LD에서 한쪽 또는 양쪽 거울면에 10^{-4} 이하의 무반사 코팅을 하여주거나 전류를 주입하는 전극형태를 변형하여 줌으로써 가능하다 [1]. 파장대역폭을 더욱 증가시켜 주기 위하여 동일한 두께의 다중양자우물 대신에 두께가 다른 다중양자우물 구조를 이용하기도 한다 [2]. 최근에는 낮은 온도 의존성, 큰 미분 이득 그리고 낮은 문턱전류밀도 특성을 갖는 양자점을 활성층으로 이용하는 연구가 진행되고 있다. 이는 자발형성 양자점을 성장하는데 있어 자연적으로 발생하는 양자점의 다양한 크기 분포 (inhomogeneous broadening)가 파장대역폭을 더욱 증가시킬 수 있는 가능성을 제공하기 때문이다 [3]. 현재까지 진행된 대부분의 양자점 SLD는 GaAs 기반 1.3 μm의 발광특성을 갖는 InGaAs 양자점을 사용하고 있다 [4, 5]. InP를 기반으로 하는 In(Ga)As 양자점은 In 조성에 의해 격자 불일치를 가지므로 에피층 내에 부정합 전위가 발생하는데 이로 인해 전기적, 광학적 특성을 저하시키기 때문인 것으로 이해되고 있다. 최근 1.5 μm 발광파장을 갖는 InGaAs / InGaAsP / InP 양자점 LD가 펄스 구동에서 상온 발진 되고 있으나 [6], 아직 기존 양자우물기반 LD 특성을 능가하지 못하고 있는 실정이다. 그에 따라서 상대적으로 1.5 μm 발광파장을 갖는 양자점 SLD는 거의 보고되지 않는 실정이다.

본 연구에서는 1.5 μm 발광파장을 갖는 InGaAs / InGaAsP / InP 양자점을 이용하여 SLD를 제작하였다. F-P 공진 모드를 억제하기 위하여, 즉 넓은 파장대역폭을 얻기 위하여 J 형태의 전극구조를 사용하였다. 제작된 SLD의 광출력은 상온연속동작으로 3 mW, 3-dB 파장대역폭은 55 nm로 측정되었다. 이와 같은 특성은 SLD 가 WDM-PON (passive optical network)의 핵심 광원으로 이용될 수 있음을 설명하여 준다.

Ⅱ. 실 험

그림 1은 ㈜나노에피에서 유기금속 화학기상 증착법 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)으로 성장된 InGaAs / InGaAsP / InP 양

* [전자우편] hikoel@kist.re.kr

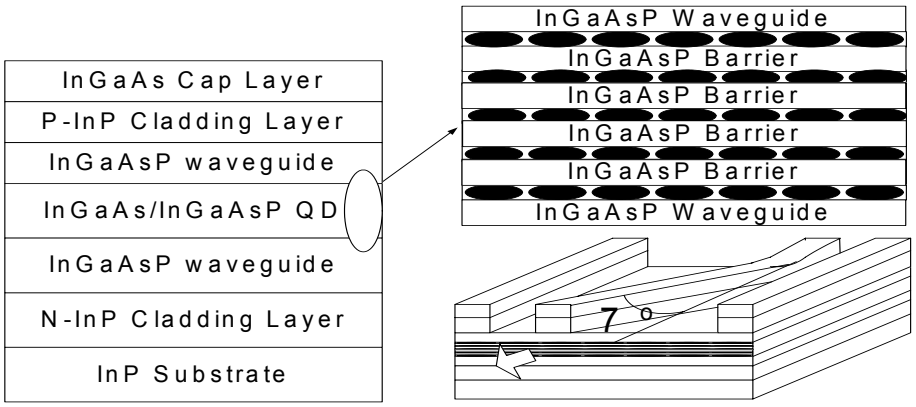


Fig. 1. Schematic structures of the epi-wafer including 1.55 ㎛ InGaAs QD and SLD

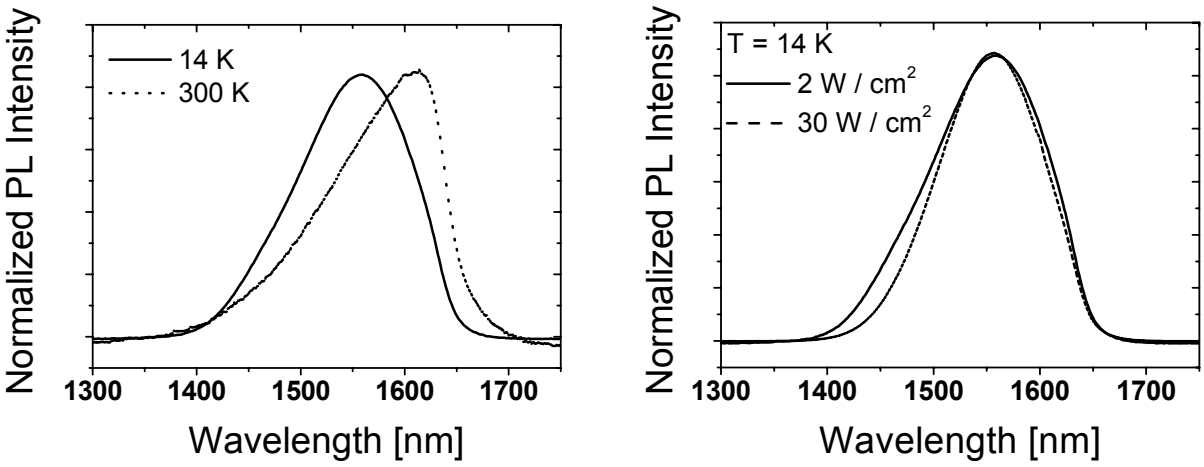
자점 시료의 구조를 보여준다. InP (001) 기판 위에 200 nm 두께의 InP 완화층과 1100 nm 두께의 n - InP cladding 층을 성장한 후 [7], InGaAsP (λ_g = 1.1 μm) 가이드층과 InGaAs 양자점으로 구성된 활성층, 그리고 다시 InGaAsP (λ_g = 1.1 μm) 가이드층을 순차적으로 성장하였다. 이때 InGaAsP 가이드층의 두께는 100 nm로 하였다. 활성층은 5층의 InGaAs 양자점으로 구성되었으며 각각의 양자점층은 30 nm 두께의 InGaAsP (λ_g = 1.1 μm) 층으로 분리되었다. 상위 InGaAsP 가이드층 위로는 1300 nm 두께의 p - InP cladding 층과 200 nm 두께의 InGaAs 오믹층이 성장되었다.

SLD는 자발 형성된 광이 활성층을 지나면서 광 이득을 얻어 광 출력이 증폭되고 광 귀환이 일어나지 않도록 F-P 공진 모드 형성을 억제함으로써 넓은 파장대역폭을 얻게 된다. 본 연구에서는 기존 LD의 공진 조건을 억제하기 위하여 일직선 영역 (straight)과 구부러짐 영역 (bent)을 함께 갖는 J 형태의 SLD를 제작하였고, 그 기하학적 구조는 그림 1에 나타내었다 [8]. F-P 공진 모드를 효과적으로 억제하기 위해서는 구부러진 출력면의 반사율을 최소화해야 하는데 이를 위해서는 공진기 축으로부터 올바른 각 θ 의 선택이 중요하다. 각 θ 는 파장과 유효굴절률의 차이에 의해 결정된다. 본 연구에서는 올바른 각 θ 를 위하여 유한한 반사도를 가지는 경사진 거울에 대한 Fresnel 반사 손실을 고려하여 반사계수를 구하였다 [9]. 도파로의 폭이 5 μm 일때 구부러진 영역의 반사계수가 10^{-4} 이하가 되기 위해서는 도파로가 공진 축으로부터 약 7 ° 정도 기울어져야 하는 것으로 계산되었다.

양자점을 포함하는 에피웨이퍼의 기본적인 물성을 조사하기 위하여 SLD 제작과 함께 LD도 제작하였다. 앞에서도 언급한 바와 같이 SLD는 F-P 모드를 억제하기 위한 전극 구조만 다를 뿐, 기타 공정은 보통의 LD와 동일하며 다음과 같은 순서로 제작되었다. 먼저 시료의 유기세척과 함께 습기 제거를 위해 오븐에서 약 30분 동안 건조 시킨 후 spin coater를 이용하여 AZ 5214E 감광제를 시료표면에 도포하였다. 노광작업과 현상작업을 한 후 선택적 습식식각을 하였으며 PECVD를 이용하여 SiO_2 절연막을 3000 Å 증착 하였다. J 형태의 금속증착을 위하여 다시 감광제 도포, 노광, 현상작업을 거쳐 절연막 식각을 하였다. 열린 전극구조에 저항성 접촉을 형성하기 위해 p-형 금속인 Ti / Pt / Au 를 전자빔 증착기를 이용하여 각각 300/300/3000 Å 증착 후 425 °C 에서 급속 열처리 하였다. 전류 주입시 SLD의 열을 효과적으로 제거하기 위해 시료 두께를 120 ~ 130 μm 까지 박막화 하였다. 마지막으로 InP 기판에 n-형 금속인 AuGe / Ni / Au 를 열 증착기를 이용하여 각각 300/300/3000 Å 을 증착 후 385 °C 에서 급속 열처리 하였다. 제작된 SLD는 길이 1 ~ 2.5 mm로 절단하였으며 무반사 코팅은 하지 않았다.

Ⅲ. 결과 및 토의

그림 2 (a)는 14 K와 300 K에서 측정된 PL 특성 곡선을 보여준다. 중심피크의 파장 변화는 온도 증가



(a) Temperature dependence (14 K and 300 K)

(b) Excitation power dependence (2 W / cm^2 and 30 W / cm^2)

Fig. 2. Photoluminescence characteristics of InGaAs QD

에 따른 적색편이를 나타내며 PL 반치폭은 각각 62 meV와 69 meV로서 거의 동일함을 알 수 있다. 이와 같이 온도에 따라 PL 반치폭의 변화가 적은 것은 양자점에서의 에너지준위 불연속성에 기인한 것으로 양자점 고유 특성중의 하나이다. 한편 양자우물 PL 반치폭의 경우는 저온에서 보통 30 meV의 특성을 나타내고 있다는 것과 비교할 때 62 meV는 상당히 넓은 편이다. 이는 앞서 언급한 바와같이 양자점 크기의 비균일성 (inhomogeneous broadening)에 기인하는 것으로 설명될 수 있다. 그림 2 (b)는 동일한 온도 (14 K)에서 여기광 세기를 2 W / cm^2 와 30 W / cm^2 에서 측정된 PL 특성곡선을 나타낸 것이다. 여기광 세기가 15 배 증가하여도 PL spectrum의 peak 위치와 모양은 거의 변화되지 않음을 관찰할 수 있다. 이는 전도대역과 가전자대역의 첫번째 에너지 준위를 차지하는 캐리어들이 충분한 여기 에너지임에도 불구하고 더 높은 에너지 준위로 여기 되지 않았기 때문이다.

그림 3은 1 μs 펄스 폭과 0.1 % 주기를 갖는 펄스 구동에서 측정 온도에 따른 문턱전류 값을 보여준다. LD의 특성 온도 (T_o)와 문턱전류 (I_{th})와의 관계식은 $I_{th} = I_o \exp (T / T_o)$로 표시되며, 이 관계식으로부터 선형 fitting된 특성온도는 300 K 위, 아래에서 각각 57 K 와 41 K 이었다. 이는 CW 동작된 1.5 μm 의 발광 파장을 갖는 InAs / InGaAs / InP 양자점 LD의 실온에서의 특성온도 56 K와 매우 유사한 값이다 [10]. LD에서 일반적으로 동작온도가 증가하면 전자가 열적 요란에 의해 고 에너지 상태가 되고 활성영역에서 클래드층으로 넘쳐 흐르는 누설전류가 많아지며 비발광 재결합인 Auger 효과가 현저해진다. 그러므로 광 손실 (optical loss)는 커지고 소자의 온도 특성은 더욱 좋지 않게 된다. 그 결과 문턱전류는 더욱 높아지게 된다. 300 K 이상에서 특성온도가 급격하게 작아지는 이유 역시 주입전류에 따른 소자의 온도 특성이 현저히 떨어지기 때문이다.

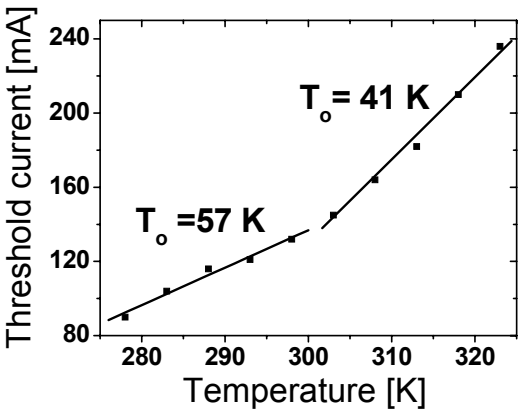


Fig. 3. Characteristic temperatures of 1.55 μm InGaAs QD LD with the width of 5 μm and cavity length of 1 mm (pulse width : 1 ㎲, duty cycle : 0.1 %)

그림 4는 길이가 2.5 mm (일직선 영역 1mm와 구부러짐 영역 1.5 mm)인 SLD의 CW 광출력 특성을

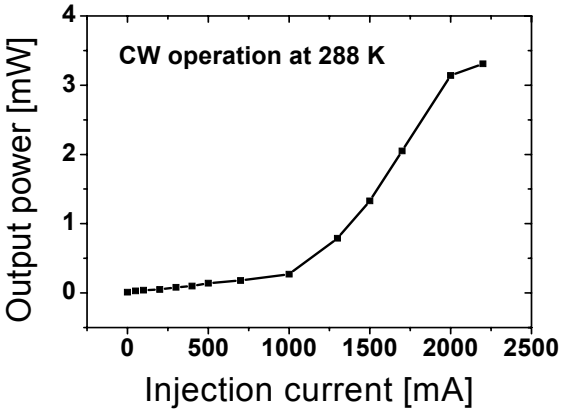


Fig. 4. Output power versus injection current characteristics : J-shaped SLD with 1 mm straight and 1.5 mm bent part is measured under CW operation at 288 K

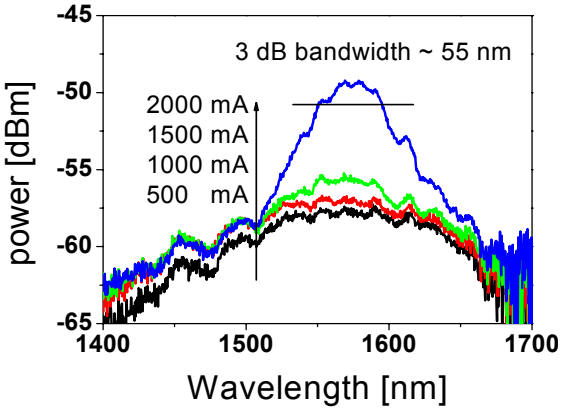


Fig. 5. Electroluminescence characteristics of 1.55 μm InGaAs QD SLD at different injection currents

나타낸 것이다. 288 K 에서 측정된 turn-on 전류밀도 값은 2.5 kA/cm^2 이며 최대 광 출력은 2.2 A 에서 3.2 mW 에 도달하였다. 이러한 높은 전류 밀도와 낮은 광 출력은, 앞에서도 언급되었듯이 광 손실을 증가시키는 활성층 온도의 상승과 연속 주입전류에 의한 주입케리어 밀도의 상승 효과로 설명될 수 있다. 특히 1.5 μm ~ 1.6 μm 발광파장을 갖는 InGaAs / InGaAsP / InP 계열의 주된 광 손실 메카니즘은 가전자 대역의 가장 낮은 준위인 split-off 대역에서 heavy-hole 대역까지의 캐리어들의 흡수로부터 기인하게 되고 이러한 메커니즘은 온도에 강하게 의존한다 [11]. 그러므로 흡수 손실을 보상하기 위해 주입케리어 밀도는 더욱 커지게 되며, 활성층 온도는 더욱 증가하게 된다. 또한 F-P 공진 모드를 억제하기 위한 SLD의 기하학적 구조상 한쪽 반사면의 반사율이 매우 작기 때문에 연속발진을 위한 turn-on 이득계수는 더욱 커져야 된다. 이렇듯 흡수 손실과 반사면의 낮은 반사율을 보상하기 위해 주입케리어 밀도는 더욱 증가하게 되며 활성층의 온도가 함께 상승함으로써 높은 전류밀도와 낮은 광 출력을 얻게 된다.

그림 5는 다양한 주입전류에 대한 EL 특성곡선을 보여준다. Turn-on 전류 1 A 아래에서는 자발방출에 의한 넓은 EL 특성을 보여주고 있으며 turn-on 전류 이상에서는, 그림 2 (a) 300 K PL 피이크의 중심 파장이 1613 nm 임을 고려하면, 여기 발광에 의한 EL 특성임을 알 수 있다. 3-dB 파장대역폭은 2 A에서 약 55 nm 이었다. 양자우물을 활성층으로 하는 SLD의 경우 파장대역폭은 보통 22 nm 수준이고 양자우물을 다르게 한 chirped 양자우물인 경우 60 nm의 파장대역폭 특성이 보고 되었다 [12]. 본 연구에서처럼 단순히 양자점만으로 파장대역폭 55 nm를 얻은 것은 앞에서 언급한 바와 같이 양자점 크기의 불균일에 의한 영향인 것으로 판단된다. 양자우물에서와 같이 양자점의 크기가 다른 chirped 양자점을 사용할 경우 더 넓은 파장대역폭 특성을 갖는 SLD 제작이 가능할 것이다.

Ⅳ. 결 론

InP(001) 기판 위에 성장된 InGaAs 양자점 구조를 사용하여 PL 광 특성과 SLD 소자 특성을 측정하였다. PL의 반치폭은 14 K 와 300 K에서 각각 62 meV 와 69 meV로 측정되었으며 측정온도에 대한 이처럼 낮은 반치폭 변화는 양자점의 고유 성질을 잘 나타낸 것이다. J 형태의 전극구조를 가진 SLD를 제작하였으며 상온에서 광 출력은 CW 3 mW 였고 이때 파장대역폭은 55 nm 이었다. 이와 같이 넓은 파장대역폭은 양자점의 크기 불균일에 기인한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 기관고유사업(과제번호 2V00780)의 지원에 의해 수행되었다.

참고 문헌

[1] J. H. Song, S. H. Cho, I. K. Han, Y. Hu, P. J. S. Heim, F. G. Johnson, D. R. Stone, and M. Dagenais, IEEE Photon. Technol. Lett, **12**, 783 (2000).

[2] T. Yamatoya, S. Sekiguchi, F. Koyama, and K, Iga, Japan J. Appl. Phys, **40**, 678 (2001).

[3] Z. Z. Sun, D. Ding, Q. Gong, W. Zhou, B. Xu, and Z. G. Wang, Opt. Quantum Electron, **31**, 1235 (1999).

[4] Z. Y. Zhang, Z. G. Wang, B. Xu, P. Jin, Z. Z. Sun, and F. Q. Liu, IEEE Photon. Technol. Lett, **16**, 27 (2004).

[5] L. H. Li, M. Rossetti, and A. Fiore, J. Cryst. Growth, **278**, 680 (2005).

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

[7] S. H. Pyun, S. H. Lee, I. C. Lee, H. D. Kim, Weon G. Jeong, J. W. Jang, N. J. Kim, M. S. Hwang, D. Lee, J. H. Lee, and D. K. Oh, J. Appl. Phys. **96**, 5766 (2004).

[8] C. F. Lin, and C. S. Juang, IEEE Photon. Technol. Lett, **8**, 206 (1996).

[9] D. Marcuse, J. Lightwave. Technol, **7**, 336 (1989).

[10] F. Lelarge, B. Rousseau, B. Dagens, F. Poingt, F. Pommereau, and A. Accard, IEEE Photon. Technol. Lett, **17**, 1369 (1996).

[11] A. R. Adams, M. Asda, Y. Suematsu, and S. Arai, Japan J. Appl. Phys. **19**, 621 (1980).

[12] T. Yamatoya, S. Mori, F. Koyama, and K, Iga, Japan J. Appl. Phys. **38**, 5121 (1999).

<<Research Paper>> Journal of the Korean Vacuum Society Vol.15 No.5, September 2006, pp.493~498

Optical characteristic of 1.5 ㎛ InGaAs/InGaAsP/InP QD Superluminescent Diode

Young-Chae Yoo[1,3], Jung-Il Lee[1], Kyoung-Chan Kim[1],
Eun-Kyu Kim[2], Gil-Ho Kim[3], Il-Ki Han[1*]

[1]*Nano Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-130*
[2]*Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791*
[3]*Department of Electronic and Electrical Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 440-746*

(Received February 20, 2006)

Superluminescent diodes (SLD) with the emitting wavelength of 1.55 ㎛ was fabricated on InGaAs quantum dot structure grown by MOCVD. The output power and 3-dB bandwidth at room temperature and continuous wave operation were 3 mw and 55 nm, respectively.

Keywords : InGaAs/InGaAsP/InP QD, Photoluminescence, Electroluminescence, Superluminescent Diode

* [E-mail] hikoel@kist.re.kr