

GaAs 기반 1300 nm 파장대역 InAs 양자점 레이저 다이오드의 발진 특성

김광웅^{a,b} · 조남기^a · 송진동^a · 이정일^a · 박정호^b · 이유종^c · 최원준^{a*}

^a한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 서울 136-791

^b고려대학교 전자공학과, 서울 136-701

^c동의대학교 정보통신공학과, 부산 614-714

(2009년 7월 9일 받음, 2009년 7월 22일 수정, 2009년 7월 23일 확정)

Migration Enhanced Molecular Beam Epitaxy를 통해 성장한 GaAs 기반 1300 nm 파장대역 InAs 양자점 레이저 다이오드의 발진 특성을 연구하였다. 펄스 및 상온 연속 동작에서 전류 주입 및 동작 온도 변화에 따른 L-I 특성과 발진 스펙트럼 측정을 통해 바닥준위(1302 nm)에서 여기준위(1206 nm)로의 발진 파장의 전환을 관찰하였으며 이는 양자점 바닥준위 이득의 포화로 이해된다. 상온 펄스 동작시 문턱전류 밀도는 92 A/cm², 발진 파장은 1311 nm이며, 상온 연속 동작시 문턱전류 밀도는 247 A/cm², 발진 파장은 1320 nm이다.

주제어 : GaAs, In(Ga)As, 양자점 레이저 다이오드, 분자선 에피택시, Migration enhanced epitaxy

I. 서 론

자발형성 양자점(self assembled quantum dot)은 양자점(quantum dot: QD)의 밀도에 따라 저밀도 양자점(1~2 QDs/ μm^2)과 고밀도 양자점($>10^{10}$ QDs/cm²)으로 구분할 수 있다. 저밀도 양자점의 경우 단일 양자점의 특성을 측정하기 용이하며, 단일 양자점에서 보이는 특성이 원자의 특성과 유사하여, 원자의 특성 연구 및 응용 연구를 위한 물리학 분야의 기초연구와 양자 정보처리, 단광자 광원의 응용으로 활발하게 연구되고 있다 [1,2]. 고밀도 양자점의 경우 다수의 양자점군(QD ensemble)이 나타내는 특성이 기존의 양자우물(quantum well: QW)과 비교하여 높은 이득 및 효율, 높은 열적 안정성 등의 특성을 기반으로, 반도체 광증폭기(SOA), 발광 다이오드(LED), 고휘도 발광 다이오드(SLD), 레이저 다이오드(LD) 등 발광 소자와 적외선 검출기 및 태양전지와 같은 수광 소자로의 응용이 활발히 진행되고 있다 [3-7].

근적외선 레이저 다이오드의 경우 주로 광통신용 송신기로 응용되고 있는데, 광섬유 기반 광전송에 있어 EDFA(erbium-doped fiber amplifier)의 여기 파장 대역인 980

nm, 낮은 분산(dispersion)을 갖는 1300 nm, 광신호의 감쇄가 가장 작은 1550 nm 파장대역에서 응용되고 있다. 이 중 980-1300 nm 파장대역에서는 GaAs 기판을 이용한 양자점 레이저 다이오드(QD-LD), 1300-1550 nm 파장대역에서는 InP 기판을 이용한 QD-LD에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 양자우물 레이저 다이오드(QW-LD)에 비하여 낮은 문턱전류 밀도, 높은 특성온도 및 온도에 따라 작은 발진 파장 변화 등 우수한 특성이 보고된 바 있으며, 이는 기본적으로 양자우물 구조의 2차원적인 운반자 구속보다 양자점 구조의 3차원적인 운반자 구속이 더욱 강하기 때문이다 [8]. GaAs 기판의 경우 InP 기판과 비교하여 상대적으로 저비용이며 열적 안정성 특성에 있어 우수하나, 아직까지는 GaAs 기반 QD-LD의 경우 1550 nm 파장대역 발광을 위한 양자점 형성 기술의 한계로 인해 1300 nm 파장대역 이하의 근적외선 파장대역에서 연구되고 있다.

QD-LD의 경우 기존의 QW-LD와 비교하여 낮은 문턱전류, 고출력, 상온 연속동작, 고속동작 및 높은 특성 온도 등 전반적으로 우수한 특성을 보여 근시일안에 QW-LD를 대체할 것으로 예상되나, 상용화를 위해서는 양자점의 균

* [전자우편] wjchoi@kist.re.kr

일도 및 재현성 등의 문제 해결이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

일반적으로 자발형성 양자점은 분자선 에피택시 (molecular beam epitaxy, MBE)와 금속 유기 화학 증착법(metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)을 이용하여 성장되고 있으며, 본 연구에서는 MBE로 성장한 GaAs 기반의 1300 nm 파장대역의 InAs 양자점을 활성층으로 적용한 양자점 레이저 다이오드의 발진 특성에 대해 고찰하였다.

II. 양자점 레이저 다이오드의 제작

일반적으로 자발형성 양자점의 경우 S-K(Stranski-Krastanow) 성장법을 이용해 성장해 왔으나, 본 연구의 QD-LD의 경우 MEE(migration enhanced epitaxy) 성장법을 이용하여 성장하였다. MEE QD의 경우 S-K QD와 비교하여 QD의 성장 과정에 있어 QD의 균일도 및 크기 제어가 용이하며, 광학적 특성에 있어 우수한 특성을 보여준바 있다 [9].

Fig. 1은 MBE로 성장된 QD-LD의 구조이며, 활성층은 이득 증가를 위하여 3층의 InAs DWELL(dots in a well)을 적층하였다. 지속적인 정공 주입을 위해 GaAs 분리층(spacer layer) 내부에 p형 modulation doping을 적용하

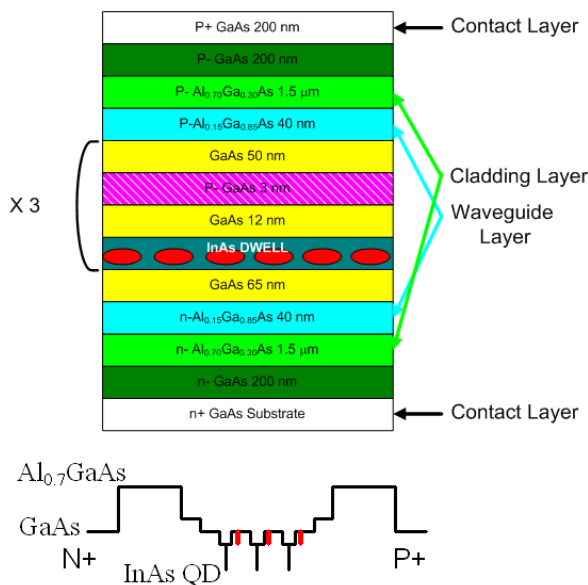


Figure 1. Structure of the QD-LD grown by MBE.

였으며 [10], 전기-광학적 특성을 개선하기 위해 성장 중 분리층의 성장온도를 증가시키는 HGTSL(high growth temperature spacer layer)를 적용하였다 [11]. 광구속(optical confinement)을 높이기 위해 클래딩 층으로는 70% Al 몰분율을 갖는 AlGaAs 층을 적용하였다 [12].

성장된 QD-LD의 PL(photoluminescence)을 통해 광학적 특성을 조사하고, ridge 형태의 LD를 제작하여 L-I 특성 및 발진 스펙트럼 측정을 통해 QD-LD의 발진 특성을 고찰하였다.

III. 양자점 레이저 다이오드의 발진 특성

상온 PL을 통해 관찰된 QD의 광학적 특성은 Fig. 2와 같이 바닥준위(ground state) 1302 nm 및 여기준위(excited state) 1206 nm에 첨두치를 보여주었다. 일반적으로 PL은 광 여기에 따라 전도띠(conduction band)로 여기된 전자가 원자가띠(valance band)로 천이하면서 방출하는 광의 결과를 나타내므로, PL의 결과를 통해 양자점준위의 에너지 분포를 파악하는데 이용된다. 양자점준위의 에너지 준위의 경우 양자점의 높이와 폭에 따른 상관관계를 가지고 있으며, 양자점의 폭이 넓을수록 바닥준위 PL의 결과는 장파장에서 나타나며, 양자점의 높이가 높을수록 바닥준위와 여기준위의 차이가 넓게 나타난다. 또한, 양자점군에서 양자점들의 균일도가 높을수록 PL의 반치폭은 좁게 나타난다. 본 연구의 MEE QD의 경우 바닥준위에서의 반치폭이 약 32 meV로 측정되었으며, 이는 기존 SK QD와 비교하여 좁은

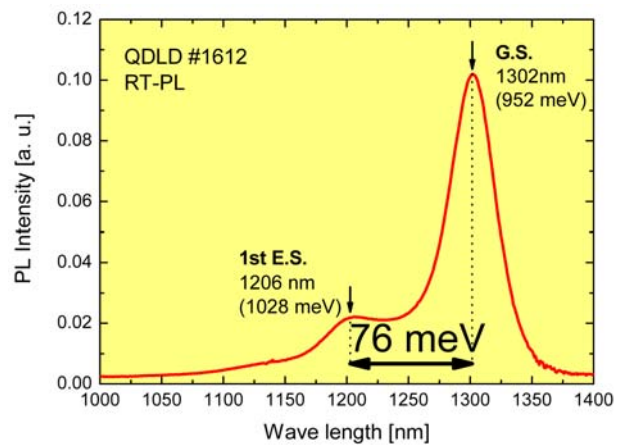


Figure 2. PL spectrum of QD-LD structure at room temperature.

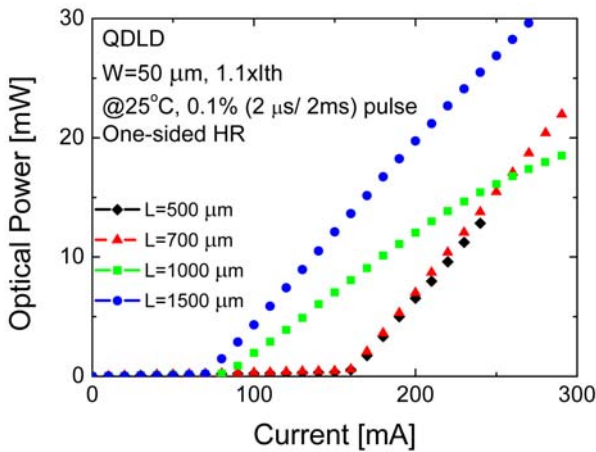


Figure 3. L-I characteristics of one-sided HR coated QD-LDs ($L=500, 700, 1000, 1500 \mu\text{m}$) under a pulsed current injection at room temperature.

반치폭을 나타내어 MEE QD의 크기 분포가 균일함을 확인하였다. 바닥준위와 여기준위간의 차이는 약 76 meV로 우수한 열 특성 및 높은 포화이득을 가질 것으로 예상된다.

펄스 전류 주입하에서 $50 \mu\text{m}$ 폭을 갖는 ridge 형태 QD-LD의 경우 HR(high reflection) 코팅 여부 및 LD 공동(cavity)의 길이에 따라 상이한 문턱전류 밀도를 보여주었다. Fig. 3은 한쪽 거울면에 70% HR 코팅을 적용한 QD-LD의 공동 길이에 따른 L-I 특성을 나타내며, 일반적으로 문턱전류밀도(J_{th})와 공동의 길이는 반비례하므로, 공동의 길이가 길어짐에 따라 이득 증가에 따라 J_{th} 가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 공동의 길이가 700에서 $1000 \mu\text{m}$ 로 길어짐에 따라 J_{th} 가 452에서 163 A/cm^2 으로 급격히 감소하는 것은 Fig. 4의 공동 길이에 따른 발진 파장에 나타낸 바와 같이 여기준위에서 바닥준위로 에너지 준위 이동에 따른 것으로 이해된다. 공동의 길이가 500, $700 \mu\text{m}$ 인 경우, 여기준위에 기인한 레이저 발진으로 약 1220 nm 파장에서 발진하였으며, 1000, $1500 \mu\text{m}$ 인 경우, 바닥준위에 기인한 발진으로 약 1310 nm 파장에서 발진하였다. 공동 길이의 증가는 QD 이득의 증가를 야기하게 되며, 이에 따라 바닥준위 발진 조건 확보로 인해 1300 nm 파장대역에서의 발진이 이루어진 것으로 이해될 수 있다. 또한 이러한 에너지 준위의 이동은 Fig. 3의 L-I 특성을 통해서도 확인할 수 있는데, 500, $700 \mu\text{m}$ 의 QD-LD의 경우 주입전류에 대한 출력광의 기울기가 1000, $1500 \mu\text{m}$ QD-LD의 경우보다 크다. 즉, 여기준위에 기인한 발진의

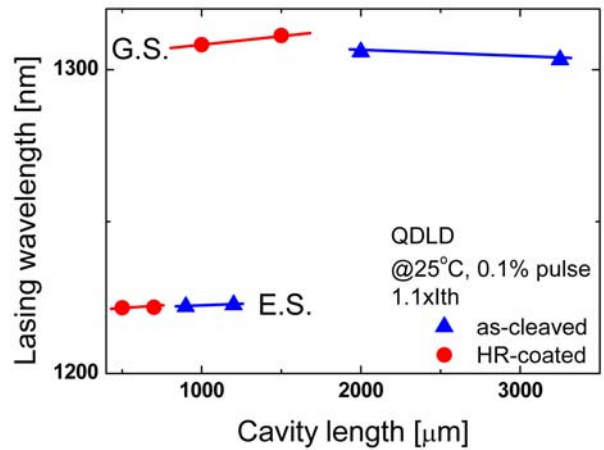


Figure 4. Lasing wavelengths of QD-LDs as a function of cavity lengths under a pulsed current injection.

경우 바닥준위에 기인한 발진의 경우와 비교하여 상대적으로 주입전류에 대한 출력광의 기울기가 크다. 이는 보어의 원자 모델과 유사하게 이해될 수 있는데, 에너지 준위가 높을수록 채워질 수 있는 전자의 수가 급격히 늘어나므로 충분히 많은 주입 전류하에서는 여기준위에 여기될 수 있는 전자의 수가 바닥준위에 여기될 수 있는 전자의 수보다 많게 된다. 충분한 주입 전류하에서 발광 효율은 전도띠에서 원자가띠로 천이하는 전자의 수 또는 확률로 근사할 수 있으며, 동일 주입 전류하에서 바닥준위와 여기준위에 채워진 전자가 모두 천이한다고 가정했을 때, 여기준위로부터 천이하는 전자의 수가 바닥준위로부터 천이하는 전자의 수보다 많기 때문에 높은 효율, 즉 주입전류에 대한 출력광의 기울기가 큰 것으로 이해할 수 있다.

QD-LD에서의 이와 같은 에너지 준위 이동은 전류 주입량 변화에 따라서도 그 현상을 관찰할 수 있는데, Fig. 5의 $15 \mu\text{m}$ 폭과 $1200 \mu\text{m}$ 길이의 공동을 갖는 QD-LD의 경우 250 mA의 주입전류를 전후로 하여 L-I 특성에서 굴곡(kink)이 발생한다. 일반적으로 레이저의 L-I 특성에서 굴곡이 발생하는 경우는 모드의 변환 또는 앞서 기술한 발진 에너지 준위 이동에 의해 발생한다. Fig. 6의 발진 스펙트럼에서 확인할 수 있는바와 같이 Fig. 5의 주입전류 (i)에서는 QD의 바닥준위인 1300 nm에 기인하여 발진을 하였으며, 주입 전류 (ii)에서는 QD의 여기준위인 1206 nm 및 바닥준위에 기인하여 발진을 하였다. 발진파장은 각각 약 1310, 1220 nm이며, 전류 주입하의 발진 파장과 상온 PL

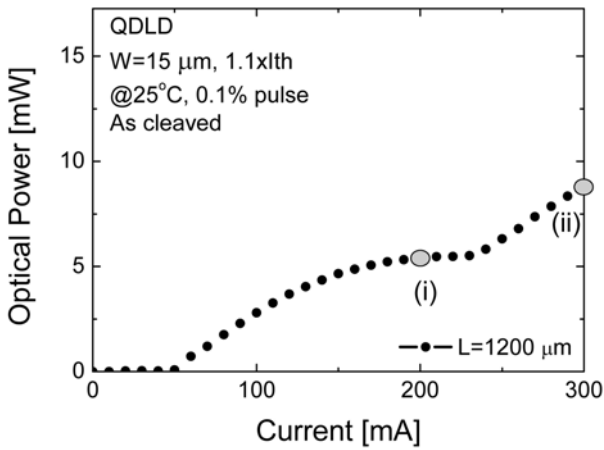


Figure 5. L-I characteristic of 15 μm -wide and 1200 μm -long QD-LD. (i) before a kink and (ii) after a kink.

상의 침두치의 차이는 각각 10, 14 nm 로 다른데, 이는 주입 전류가 활성층에 도달하기까지의 저항성 열에 의한 것으로 이해된다. 특히 여기준위에 기인한 발진의 경우 그 차이가 더 큰 것은 발진에 참여하는 운반자의 수가 많기 때문이다. 이러한 에너지 준위의 이동은 주입 전류 증가에 따라 바닥준위의 이득은 포화되고 여기준위의 이득이 QD-LD의 발진에 기여하는 것으로 이해된다. 여기준위의 경우 바닥준위보다 많은 수의 전자-정공쌍을 형성하게 되므로 높은 이득을 제공하며, 더 많은 주입 전류를 주입함에 따라 여기준위에서의 발진이 바닥준위에서의 발진보다 우세한 현상을 보이는 것을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다. Fig. 7은 주입전류에 따른 발진 스펙트럼 세기의 최대치를 평균화하

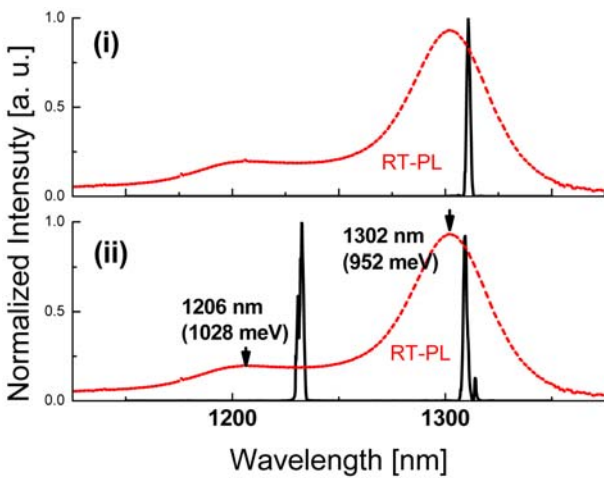


Figure 6. Lasing spectrum as indicated in Fig. 5 (i) before a kink and (ii) after a kink.

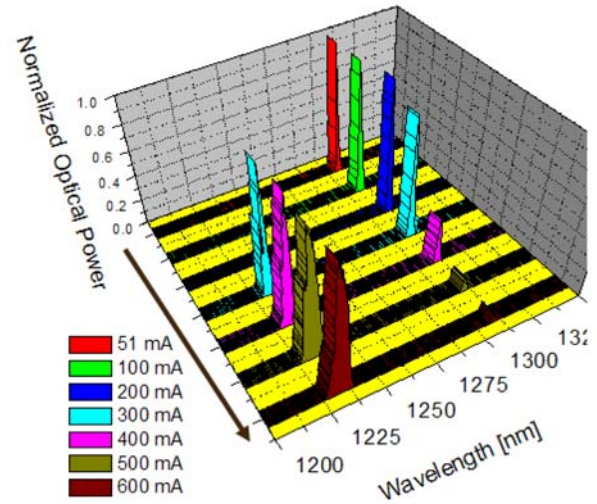


Figure 7. Lasing spectrum under various injection current conditions at room temperature.

여 나타낸 것이다.

동작 온도에 따른 QD-LD의 특성을 살펴보면, Fig. 8에서와 같이 펄스 전류 주입하에서 QD-LD의 동작 온도를 10–50°C에서 구동하는 경우 바닥준위에 기인한 발진을 보여 주었으며 온도 상승에 따라 발진 파장이 장파장으로 이동하였다. 온도에 따른 발진 파장의 변화는 0.53 nm/K 로써, 기존에 보고된 DWELL 구조의 QD-LD와 유사하며, 이는 일반적으로 온도가 증가함에 따른 밴드갭 축소 현상에 의한 것으로 이해된다. 그러나, 50°C 이상에서는 여기준위에서 발진을 보여주었는데, 이는 높은 온도에서 바닥준위의 전자가 열 에너지에 의해 여기준위로 뛰게 되고 이에 기인한 발진이 이뤄진 것으로 이해된다. 특성온도(T_0)는 113 K를 나타내어

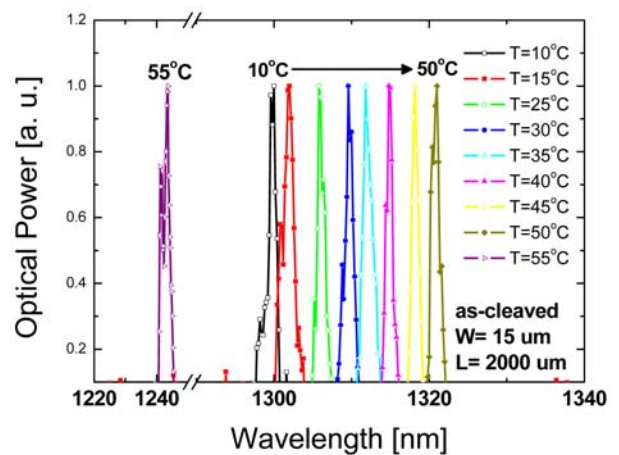


Figure 8. Lasing spectrum as a function of operation temperatures.

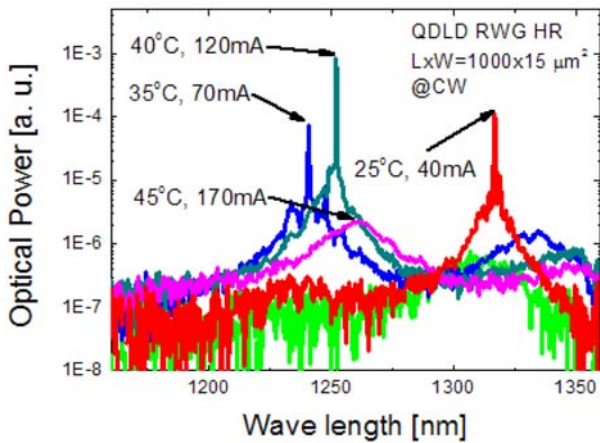


Figure 9. Lasing spectrum as a function of operation temperatures.

해외 우수 그룹들의 보고와 비슷한 수준을 나타내었다.

상온 연속 전류 주입의 경우, 펄스 전류 주입의 경우에 비해 저항성 열이 크기 때문에, QD-LD 내부의 동작 온도가 상승하여 상대적으로 낮은 특성을 보여주었다. Fig. 9의 온도에 따른 QD-LD의 발진 스펙트럼에 보인바와 같이, 상온에서 바닥준위 발진을 하여 $J_{th}=247 \text{ A/cm}^2$, 발진파장 1320 nm 이고, 35°C 이상에서 1250 nm 파장 대역의 여기 준위에서 발진을 보여주었다. 상온 연속 동작의 문턱전류 밀도의 증가가 펄스 전류 하에서 보다 상승한 원인으로는 서브 마운트 크기의 한계에 따라, 공동의 길이가 1000 μm 로서 짧아진 것을 들 수 있고, 또 다른 요인으로는 높은 광구속을 위해 적용한 70% Al 물분율을 갖는 AlGaAs 클래딩 층의 성장시 양자점 성장을 위해 상대적으로 낮은 온도에서 성장을 하여, 광학적으로는 우수한 특성을 보여주었으나 전기적으로는 특성이 저해되었다고 판단된다.

IV. 결 론

MBE로 성장한 1300 nm 파장 대역의 GaAs 기반 InAs 양자점 레이저 다이오드의 발진 특성에 관한 연구를 보고 하였다. MEE 성장법으로 성장된 InAs 양자점의 광학적 특성을 PL을 통해 고찰하였고, ridge 형태의 LD를 제작하여, 펄스 및 연속 전류 주입하에서 그 특성을 고찰하였다. 펄스 전류 주입 하에서 문턱전류는 92 A/cm^2 , 발진 파장은 1311.2 nm, 특성온도는 113K, 온도에 따른 발진 파장의 변화는 0.53 nm 이다. 상온 연속 전류 주입 하에서 문턱전류

는 247 A/cm^2 , 발진 파장은 1320 nm이다.

전류 주입 및 동작 온도 증가에 따른 바닥준위에서 여기 준위로의 발진 파장 이동이 관찰되었으며, 이는 바닥준위의 이득 포화에 따른 것으로 이해된다. 본 연구에서는 활성층으로 양자점을 3층 적재하였으나 이후 계속되는 연구를 통해 양자점의 적층 수를 늘리고 양자점 레이저 다이오드의 구조를 최적화하여 바닥준위의 이득을 증가시킨다면, 기존의 양자우물 레이저 다이오드를 대체할 수 있는 고효율 양자점 레이저 다이오드의 개발이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2009년 KIST 기관고유과제, 지식경제부 차세대신기술사업, 교육과학기술부의 GRL사업 및 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- [1] Zhiliang Yuan, et al, Science. **295**, 102 (2002).
- [2] Edo Waks, et al., Nature. **420**, 762 (2002).
- [3] S. Dommers, et al., Applied Phiscis Letters, **90**, 123 (2007).
- [4] K. W. Kim, et al., Japanese Journal of Applied Physics, **45**, 8010 (2006).
- [5] 유영채 외, 한국진공학회지, **16**, 353 (2007).
- [6] S. H. Hwang, et al., Japanese Journal of Applied Physics, **44**, 5696 (2005).
- [7] S. Tomic, et al., Applied Phiscis Letters, **93**, 26 (2008).
- [8] 정경옥 외, 한국진공학회지, **16**, 371 (2007).
- [9] N. K. Cho, et al., Applied Phiscis Letters, **88**, 133104 (2006).
- [10] O. B. Shchekin, et al., Applied Phiscis Letters, **77**, 466 (2000).
- [11] H. Y. Liu, et al., Applied Phiscis Letters, **85**, 704 (2004).
- [12] K. W. Kim, et al., Journal of the Korean Physical Society, **49**, 1169 (2006).

Lasing Characteristics of GaAs-Based 1300 nm Wavelength Region InAs Quantum Dot Laser Diode

K. W. Kim^{a,b}, N. K. Cho^a, J. D. Song^a, J. I. Lee^a, Y. J. Lee^c, and W. J. Choi^{a*}

^a*Nano Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791*

^b*Department of Electronics Engineering, Korea University, Seoul 136-701*

^c*Department of Information and Communication Engineering, Dong Eui University, Busan 614-714*

(Received July 9, 2009, Revised July 22, 2009, Accepted July 23, 2009)

We have investigated the lasing characteristics of GaAs-based 1300 nm wavelength region InAs Quantum Dot Laser Diode grown by Migration Enhanced Molecular Beam Epitaxy. Under a pulsed and CW operation, we observed the state switching of lasing wavelength from ground state (1302 nm) to excited state (1206 nm) due to the gain saturation of ground state. Under a pulsed operation, $J_{th}=92 \text{ A/cm}^2$, $\lambda_L=1311 \text{ nm}$ and under a CW operation, $J_{th}=247 \text{ A/cm}^2$, $\lambda_L=1320 \text{ nm}$.

Keywords : GaAs, In(Ga)As, Quantum dot laser diode, Molecular beam epitaxy, Migration enhanced epitaxy

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