

InGaAs 양자점 레이저 다이오드와 양자우물 레이저 다이오드의 특성 비교

정경욱^{1,2} · 김광웅¹ · 유성필¹ · 조남기¹ · 박성준¹ · 송진동¹ · 최원준¹ · 이정일¹ · 양해석²

¹한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 서울 136-791

²중앙대학교 자연과학대학 물리학과, 서울 156-756

(2007년 8월 14일 받음)

분자선 에피택시(molecular beam epitaxy, MBE)로 성장된 InGaAs 양자점 레이저 다이오드(quantum dot laser diode, QD-LD)와 InGaAs 양자우물 레이저 다이오드(quantum well laser diode, QW-LD)의 특성을 비교하였다. 펄스 입력전류 하에서 문턱전류밀도(threshold current density, J_{th}), 특성온도(characteristic temperature, T_0), 온도에 따른 발진파장의 변화도($d\lambda/dT$)를 측정된 결과, 양자우물 레이저 다이오드는 $J_{th} = 322 \text{ A/cm}^2$, $T_0 = 55.2 \text{ K}$, $d\lambda/dT = 0.41 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 로 측정되었으며, 양자점 레이저 다이오드는 $J_{th} = 116 \text{ A/cm}^2$, $T_0 = 81.8 \text{ K}$, $d\lambda/dT = 0.33 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 로 측정되었다. 양자점 레이저 다이오드는 양자우물 레이저 다이오드와 비교하였을 때, 문턱전류밀도 및 발진 광 파워가 상대적으로 우수한 결과를 보여주었다.

주제어 : 양자점, 양자점 레이저 다이오드, InGaAs

I. 서 론

최근 양자점을 이용한 낮은 전력, 초고속 및 우수한 광학적 특성 등을 요구하는 차세대 광통신용 소자와 단전자 소자 등을 구현하기 위해 집적도를 높이고 전력소모를 줄일 수 있는 양자소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 양자소자 구현을 위한 양자구조 현상은 일반적으로 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy, MBE)나 금속 유기 화학 증착법(metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)과 같은 방법을 사용해서 이루어지고 있는데, 양자점을 활성층(active medium)으로 갖는 광전소자의 경우, 양자우물을 비롯한 기존 양자구조를 활성층으로 갖는 경우에 비해 특성이 현저하게 개선 될 것으로 기대 되고 있다 [2-4].

양자점 레이저 다이오드의 경우 일반적으로 낮은 문턱전류와 고출력 특성을 갖는 우수한 성능의 레이저 다이오드를 만들 수 있을 뿐만 아니라 상온 연속동작, 고속동작, 높은 특성온도 및 GaAs 기반의 1.3~1.5 μm 발광 파장 실현 등의 우수한 특성들이 예측되고 있다 [2-5]. 레이저 다이오드의 이중접합 구조에 쓰이는 기판 재료로서, InP 기반의 레이저 다이오드에 비해 GaAs는 격자 불일치가 더 작기 때문에 InGaAs 활성층에 미치는 변형효과가 더 작게 일어난다. 따라서 GaAs 기판위에 InGaAs 활성층을 성장시키

는 것이 더 안정적인 소자를 만드는데 효과적이다 [6].

특히 고출력 980 nm 레이저 다이오드는 Er^{3+} 가 도핑된 광섬유(erbium-doped fiber amplifiers, EDFA)의 pump-ing source로 사용하고 있다. EDFA의 pumping source로 1480 nm 레이저 다이오드도 사용되고 있는데, 1480 nm 레이저 다이오드에 비해 980 nm 레이저 다이오드는 광 이득이 높고 잡음이 적으며 빛을 편광방향에 상관없이 증폭시키기 때문에 광통신 시스템에서 매우 유용하게 쓰인다 [7]. 따라서 고출력 980 nm 레이저 다이오드의 효율을 높이는 일은 장거리 고속광통신의 발전에 대단히 의미 있는 일이 될 것이다.

본 연구에서는 분자선 에피택시로 성장된 InGaAs 양자점을 활성층으로 하는, 950~990 nm 파장대역의 레이저 다이오드를 제작하고 특성을 측정하였다. 같은 방법으로 성장시킨 InGaAs 양자우물을 활성층으로 하는 레이저 다이오드와의 차이점을 전기-광학적 방법으로 비교분석하였다.

II. 실험 방법

그림 1은 본 연구에 사용된 InGaAs 양자우물 레이저 다이오드와 InGaAs 양자점 레이저 다이오드의 구조를 나타낸다. 활성층인 양자우물과 양자점을 제외한 나머지 구조

* [전자우편] wjchoi@kist.re.kr

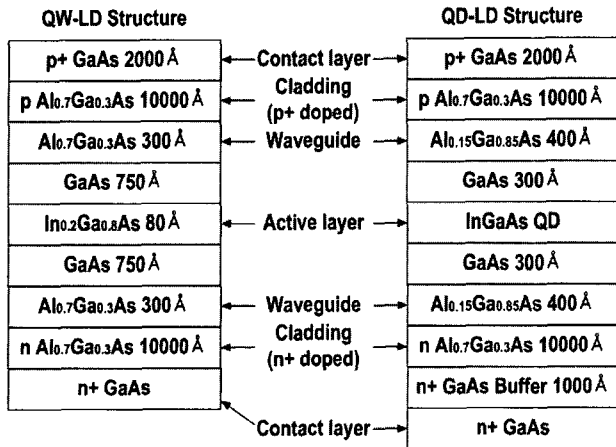


그림 1. QW-LD와 QD-LD의 구조

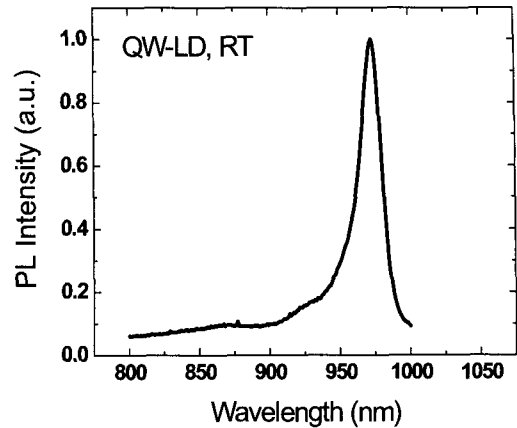


그림 2. (a) QW-LD 상온 PL

를 거의 동일하게 하여 분자선 에피택시로 성장시켰다.

본 실험에 사용된 레이저 다이오드 샘플들은 일반적인 RWG(ridge waveguide) 레이저 다이오드 공정 과정을 거쳐 만들었다.

아세톤과 메탄올을 사용하여 유기 세척한 샘플에 폭이 25 μm 인 마스크를 씌워 UV-광식각 과정을 행하고 두께 1 μm 정도 etching을 하여 ridge를 만든다. 다음으로 플라즈마 화학 기상 증착법(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)을 이용하여 SiO₂ 막을 300 nm 증착시킨다. 그리고 SiO₂ 막을 증착시킨 ridge 위에 폭이 23 μm 인 마스크를 이용하여 UV-광식각 과정을 한 번 더 행하고, SiO₂ 박막을 식각하여 전극형성을 위한 창(window) 영역을 만든다. 이후 GaAs 기판을 polishing & lapping 과정을 통해 연마한 후 E-beam evaporator와 thermal evaporator를 사용하여 시료의 상단 및 하단에 각각 전극을 증착시킨다. 양자우물 레이저 다이오드, 양자점 레이저 다이오드의 ridge를 둘 다 폭(cavity width, W)은 25 μm 로 동일하게 맞추고, 길이(cavity length, L)를 1~2 mm 로 잘라내어 측정하였다. 측정을 위하여 샘플을 잘라낼 때 stripe 방향에 수직이 되는 면이 레이저 공진기의 거울 면이 되는데 이 면이 매끈하게 잘리지 않으면 Fabry-Perot(FP) 공진기가 제대로 형성되지 않아서 레이저가 발진하지 않는다 [8].

III. 실험 결과 및 고찰

우선 양자우물 레이저 다이오드와 양자점 레이저 다이오

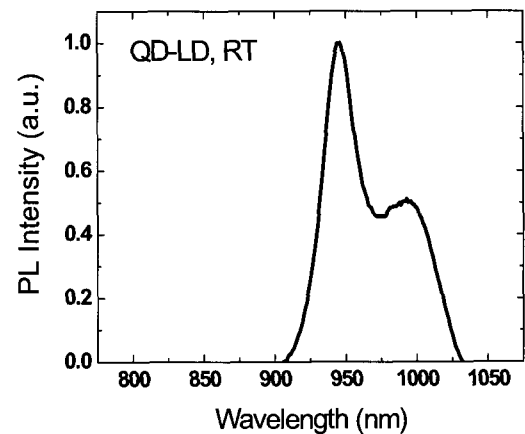


그림 2. (b) QD-LD 상온 PL

드의 발진 특성을 알아보기에 앞서 각각 상온에서의 PL을 측정해 보았다. PL 측정 조건은 532 nm 파장의 DPSS (diode pumped solid state) 레이저를 사용하여 30 mW 의 광 파워로 샘플에 조사하였고, InGaAs detector를 사용하여 상온(25 °C)에서 측정 하였다.

그림 2는 양자우물 레이저 다이오드와 양자점 레이저 다이오드의 PL을 같은 조건에서 측정한 결과이다. 상온에서 양자우물 레이저 다이오드는 970 nm에서 peak가 관측되었고, 양자점 레이저 다이오드는 940 nm와 1020 nm에서 peak가 관측되었다.

양자점 레이저 다이오드와 양자우물 레이저 다이오드의 특성을 길이는 2 mm로 하고 여기원은 2 ms 마다 폭이 2 μs 인 펄스 전류를 사용하여 측정하였다.

그림 3은 양자우물 레이저 다이오드와 양자점 레이저 다이오드의 L-I 특성을 상온에서 측정한 것이다. 상온에서

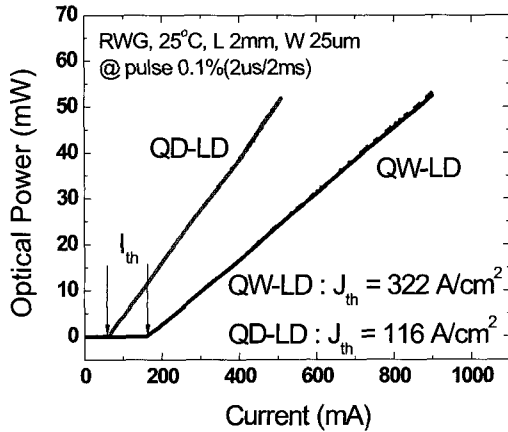


그림 3. QW-LD와 QD-LD의 상온(25°C)에서의 L-I 특성 및 J_{th}

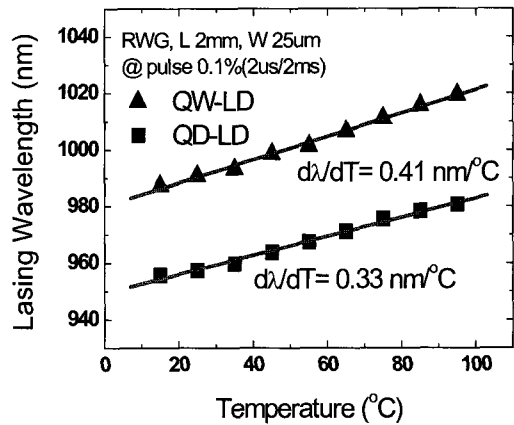


그림 5. QW-LD와 QD-LD의 온도에 따른 발진파장 변화

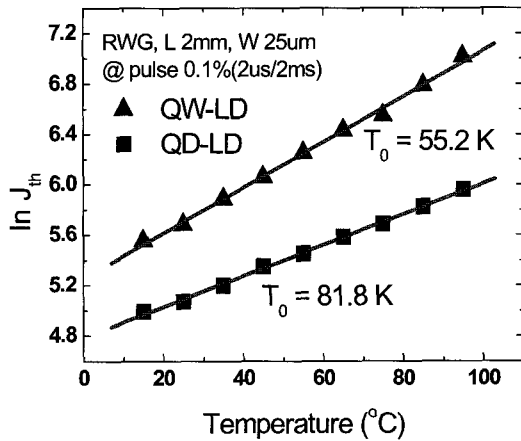


그림 4. QW-LD와 QD-LD의 온도에 따른 $\ln(J_{th})$ 의 변화 및 T_0

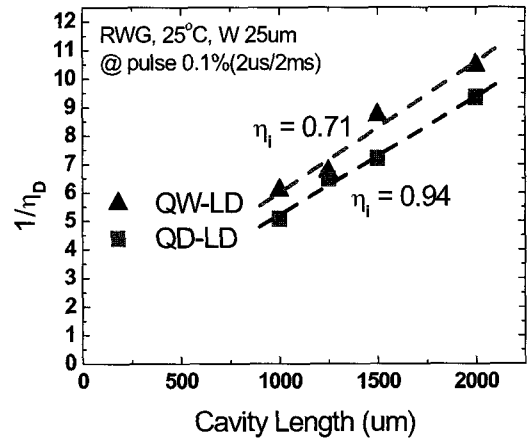


그림 6. QW-LD와 QD-LD의 양자 효율 비교

문턱전류를 구한 후 cavity의 면적으로 나누어 문턱전류밀도 J_{th} 를 계산하였다. 상온에서 문턱전류밀도는 양자우물 레이저 다이오드가 322 A/cm^2 , 양자점 레이저 다이오드가 116 A/cm^2 로 측정되었다. 이 시료들은 단순히 발진특성을 비교하기 위하여, 구조를 최적화 하지 않고 성장시킨 샘플이기 때문에 현재 양자점 레이저 다이오드의 문턱전류밀도 기록인 17 A/cm^2 보다 문턱전류밀도가 높게 측정된다 [9].

레이저 다이오드의 문턱전류밀도는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$J_{th} = \frac{J_0}{\eta_i} + \frac{1}{\Gamma} \left[\left(\frac{1}{\eta_i \beta} \right) \left(\frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} + \alpha_{int} \right) \right] \quad (1)$$

J_0 는 투명도 전류(transparency current), Γ 는 광 구속 인자(optical confinement factor), η_i 는 내부 양자 효율

(internal quantum efficiency), β 는 이득 계수(gain coefficient), L 은 cavity 길이, α_{int} 는 내부 광 손실(internal optical loss), R 은 FP 공진기에서 거울면의 반사율이다 [7]. 실험에 사용한 레이저 다이오드에서 FP 공진기의 거울면은 GaAs이며, GaAs의 반사율은 30% 이다 [10-12]. 식 (2)에서 J_{th} 는 대략 Γ^{-1} 에 비례한다. 양자점 구조가 양자우물 구조보다 캐리어 구속효과가 더 크기 때문에 광 구속 인자가 더 크므로 문턱전류밀도가 더 낮게 측정됨을 알 수 있다 [3, 13-15].

문턱전류와 특성온도 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다 [7].

$$I_{th}(T) = I_0 \exp(T/T_0) \quad (2)$$

$I_{th}(T)$ 는 문턱전류, I_0 는 상수, T_0 는 특성 온도이다. 문턱

전류 값을 이용하여 식 (2)에서부터 특성온도를 구하면, 특성온도는 양자우물 레이저 다이오드가 55.2 K, 양자점 레이저 다이오드가 81.8 K 로 측정된다.

그림 5는 양자우물 레이저 다이오드와 양자점 레이저 다이오드의 온도에 따른 발진파장의 변화를 나타낸 것이다. 양자우물 레이저 다이오드의 파장변화율은 0.41 nm/°C 이며 양자점 레이저 다이오드의 파장변화율은 0.33 nm/°C 로 측정되었다. InGaAs의 경우 온도가 올라가면 밴드갭이 작아지는 경향을 보이기 때문에 온도가 올라감에 따라 발진파장이 점점 장파장 쪽으로 나오게 됨을 확인 할 수 있다 [8].

외부 양자 효율(external quantum efficiency)은 레이저 다이오드 내부에서 생성된 광자가 외부로 빠져나오는 정도를 나타낸다. 레이저 다이오드의 외부 양자 효율은 발진파장 및 기울기 효율(slope efficiency)에 비례하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_d = \frac{2q\lambda}{hc} \frac{dP_{out}}{dI} \quad (3)$$

η_d 는 외부 양자 효율, q 는 전자의 전하량, λ 는 파장, h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도, dP/dI 는 기울기 효율이다 [8]. 레이저 다이오드의 파장은 cavity 길이에 따라 달라지기 때문에 cavity 길이를 1~2 mm 사이로 하여 측정하였다.

식 (3)을 이용하여 외부 양자 효율을 구하면, 상온에서 외부 양자 효율이 양자우물 레이저 다이오드는 $\eta_d \approx 0.16$, 양자점 레이저 다이오드는 $\eta_d \approx 0.24$ 로 계산된다.

외부 양자 효율을 이용하여 내부 양자 효율 및 내부 광 손실을 구할 수 있는데, 이 값들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\eta_d = \eta_i \left(1 + \frac{\alpha_{int} L}{\ln(1/R)} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\frac{\eta_d}{\eta_i} = \frac{\text{photon escape rate}}{\text{photon generation rate}} \quad (5)$$

η_d^{-1} , cavity length 사이의 관계그래프와 식 (4)를 이용하여 내부 양자 효율과 내부 광 손실을 구하면, 상온에서 양자우물 레이저 다이오드는 $\eta_i \approx 0.71$, $\alpha_{int} \approx 39.1 \text{ cm}^{-1}$, 양자점 레이저 다이오드는 $\eta_i \approx 0.94$, $\alpha_{int} \approx 46.7 \text{ cm}^{-1}$ 로 계산된다 [8]. 일반적인 양자우물 레이저 다이오드의 경우 활성층이 단층일 때 η_i 가 0.70~0.80 정도의 값을 가지며

실험에 쓰인 양자우물 레이저 다이오드도 비슷한 값을 나타내었다 [16-18].

식 (5)와 같이 내부 양자 효율은 다이오드 내부의 광자 생성률에 비례한다 [8]. 양자구조에서 캐리어 구속효과가 클수록 많은 캐리어들이 모이게 되고 광자가 생성될 확률이 높아진다 [19]. 양자점 레이저 다이오드가 양자우물 레이저 다이오드에 비해 더 큰 내부 양자 효율을 보이는 것은, 양자점 구조가 더 높은 캐리어 구속효과를 가지기 때문이라고 생각된다.

IV. 결 론

MBE로 성장시킨 InGaAs 양자점 레이저 다이오드가 양자우물을 활성층으로 사용했을 때에 비해 특성이 어떻게 달라지는지에 대한 연구를 수행하였다. 본 실험에서 측정된 InGaAs 양자점 레이저 다이오드의 발진특성은 양자우물 레이저 다이오드에 비해 문턱전류나 특성온도 및 파장변화율 면에서 성능이 향상되었고 발진 광 파워와 양자 효율 면에서도 더 좋은 결과가 나왔다. 결과적으로 양자우물 레이저 다이오드와 비교해서 양자점 레이저 다이오드가 상대적으로 우수한 특성을 보여주었다. 그 이유는 양자점 구조가 가지는 높은 이득, 그리고 높은 캐리어 구속효과 때문이라고 생각된다.

앞으로 연속 전류를 주입하여 최대 발진 파워를 측정하고 InGaAs 양자점 구조를 최적화하는 것이 남은 과제가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 KIST 기관고유사업의 지원을 통하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Y. J. Park, Y. M. Park, J. D. Song, W. J. Choi, I. K. Han, W. J. Cho, and J. I. Lee, Sae Mulli, The Korean Physical Society **47** (2), 127 (2003).

- [2] Jin Soo Kim, Jin Hong Lee, Sung Ui Hong, Ho-Sang Kwack, Byung Seok Choi, and Dae Kon Oh, *Journal of Korea Vacuum Society* **15** (2), 194 (2006).
- [3] Y. Arakawa and H. Sakaki, *Applied Physics Letters* **40** (11), 939 (1982).
- [4] Park Gyoungwon, O. B. Shchekin, D. L. Huffaker, and D. G. Deppe, *Photonics Technology Letters, IEEE* **12** (3), 230 (2000).
- [5] F. Klopff, J. P. Reithmaier, A. Forchel, P. Collot, M. Krakowski, and M. Calligaro, *Electronics Letters* **37** (6), 353 (2001).
- [6] Jae-In Yu, Hun-Bo Park, In-Ho Bae, and Sung Bae Park, *Sae Mulli, The Korean Physical Society* **52** (4), 420 (2006).
- [7] Kwang Woong Kim, Jin Dong Song, Won Jun Choi, Jung Il Lee, and Jung Ho Park, *Journal of the Korea Physical Society* **49** (3), 1169 (2006).
- [8] Govind P. Agrawal and Niloy K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, 2nd ed. (Van Nostrand Reinhold, New York, 1993)
- [9] H. Y. Liu, S. L. Liew, T. Badcock, D. J. Mowbray, M. S. Skolnick, S. K. Ray, T. L. Choi, K. M. Groom, B. Stevens, F. Hasbullah, C. Y. Jin, M. Hopkinson, and R. A. Hogg, *Applied Physics Letters* **89** (7), 073113 (2006).
- [10] J. Lagois, E. Wagner, W. Bludau, and K. Löscher, *Physical Review B (Condensed Matter)* **18** (8), 4325 (1978).
- [11] L. Schultheis and I. Balslev, *Physical Review B (Condensed Matter)* **28** (4), 2292 (1983).
- [12] A. I. Shkrebtii, N. Esser, W. Richter, W. G. Schmidt, F. Bechstedt, B. O. Fimland, A. Kley, and R. Del Sole, *Physical Review Letters* **81** (3), 721 (1998).
- [13] J. Y. Lim, J. D. Song, W. J. Choi, W. J. Cho, J. I. Lee, and H. S. Yang, *Journal of Korea Vacuum Society* **15** (2), 223 (2006).
- [14] Kohki Mukai, Yoshiaki Nakata, Koji Otsubo, Mitsuru Sugawara, Naoki Yokoyama, and Hiroshi Ishikawa, *Applied Physics Letters* **76** (23), 3349 (2000).
- [15] R. L. Sellin, Ch. Ribbat, M. Grundmann, N. N. Ledentsov, and D. Bimberg, *Applied Physics Letters* **78** (9), 1207 (2001).
- [16] Hideo Sugiura, Yoshio Noguchi, Ryuzo Iga, Takeshi Yamada, Hidehiko Kamada, Yoshihisa Sakai, and Hiroshi Yasaka, *Applied Physics Letters* **61** (3), 318 (1992).
- [17] B. Zhao, T. R. Chen, L. E. Eng, Y. H. Zhuang, A. Shakouri, and A. Yariv, *Applied Physics Letters* **65** (14), 1805 (1994).
- [18] Glenn-Yves Plaine, Carl Asplund, Petrus Sundgren, Sebastian Mogg, and Mattias Hammar, *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1* **41**, 1040 (2002).
- [19] A. Schmidt, A. Forchel, J. Straka, I. Gyuro, P. Speier, and E. Zielinski, *Journal of Vacuum Science and Technology B* **10**, 2896 (1992).

Comparisons of lasing characteristics of InGaAs quantum-dot and quantum well laser diodes

Kyung Wuk Jung^{1,2}, Kwang Woong Kim¹, Sung Pil Ryu¹, Nam Ki Cho¹, Sung Jun Park¹,
Jin Dong Song¹, Won Jun Choi^{1*}, Jung Il Lee¹, and Hae Suk Yang²

¹*Nano Device Research Center, Korea Institute of Science & Technology, Seoul 130-650*

²*Department of Physics, Chung Ang University, Seoul 156-756*

(Received August 14 2007)

We have investigated the lasing characteristics of the InGaAs quantum dot laser diode (QD-LD) and InGaAs quantum well laser diode (QW-LD) operated at the 980 nm wavelength range. The 980-nm lasers are used as a pumping source for a erbium-doped fiber amplifier (EDFA) and it shows high efficiency in long-haul optical fiber network. We have compared the threshold current density, the characteristic temperature, the optical power and the internal efficiency of QD-LD and QW-LD under a pulsed current condition. The QD-LD shows superior performances to the QW-LD. Further optimization of a LD structure is expected to the superior performances of a QD-LD.

Keywords : quantum-dot, quantum-dot laser diode, InGaAs

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