

# 양자점 레이저 다이오드의 식각 깊이에 따른 접합온도 측정

정정화 · 한일기\* · 이정일

한국과학기술연구원, 나노소자연구센터 서울 136-791

(2008년 9월 26일 받음, 2008년 10월 21일 수정, 2008년 11월 9일 확정)

순방향 전압-온도 (forward voltage-temperature)법을 이용하여 양자점 레이저 다이오드의 접합온도를 측정하였다. 식각 깊이가 깊은 mesa 구조의 경우 입력전류에 대한 접합온도의 증가율은 0.05 K/mA인 반면, 식각 깊이가 낮은 mesa 구조의 경우 0.07 K/mA로서 상대적으로 높게 측정되었다. 깊은 mesa 구조에서의 상대적으로 낮은 접합온도 증가율은 mesa 측면 방향으로의 열확산 효과 때문인 것으로 설명된다.

주제어 : 레이저 다이오드, 양자점, 접합온도

## I. 서 론

레이저 다이오드의 활성층에서 접합온도 (Junction temperature)는 소자의 특성을 결정지을 수 있는 중요한 요소 중의 하나이다. 특히 높은 광출력을 발광하는 고출력 레이저 다이오드의 경우 접합온도는 더욱 더 중요하다. 레이저 다이오드의 접합온도 측정법으로 마이크로-라만분광법 [1], 문턱전압법 [2], 열저항법 [3], electroluminescence 법 [4], photoluminescence 법 [5] 등이 알려져 왔지만 접합온도의 증가에 따른 발진파장이동법 [6]이 가장 보편적으로 이용되어 왔다. 최근에는 측정법이 간단하고 빠르다는 장점 때문에 LED에서 사용되어 오던 순방향 전압-온도법 (forward voltage-temperature)이 레이저 다이오드의 접합온도 측정에도 이용되고 있다 [7-9].

한편 양자점을 이용한 레이저 다이오드에 대한 연구도 지난 10여년 간 꾸준히 진행되어 왔으나 대부분 문턱전류 감소, 고속동작, 고출력화 등에 대하여 진행되었고, 접합온도 측정에 관한 연구는 상대적으로 많지 않았다 [10-13].

본 연구에서는 순방향 전압-온도법을 이용하여 양자점을 활성층으로 하는 레이저 다이오드의 접합온도 측정에 관한 결과를 설명한다. 식각 깊이가 깊은 mesa 구조를 가진 ridge 형 레이저 다이오드의 경우 입력 전류에 대한 접합온도의 증가율이 0.05 K/mA인 반면 식각 깊이가 낮은 mesa를 가진 레이저 다이오드의 경우 접합온도의 증가율은 0.07 K/mA로 측정되었다. 깊은 mesa 구조를 가진 경

우에서 상대적으로 낮은 접합온도의 증가율은 mesa 측면 방향으로의 열확산 효과 때문인 것으로 설명된다.

## II. 실 험

Fig.1은 실험에 사용된 양자점 에피구조의 개략도를 나타낸 것이다 [12]. 에피구조는 독일 Innolume 사로부터 구입한 것으로서 molecular beam epitaxy법으로 2인치 n<sup>+</sup>-GaAs 기판위에 성장되었다. 기판 위에 두께 500 nm의 n<sup>+</sup>-GaAs 버퍼층, 두께 1.5 μm의 n-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 클래딩층, 그리고 GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As (2 nm/2 nm) 층이 18번 반복된 초격자층이 순차적으로 성장되었다. 초격자층 위에 5개의 InAs/GaAs 양자점층으로 구성된 활성층이 성장되었는데 양자점 층 사이에는 두께 38 nm의 GaAs 층을 삽입하였다. 활성층 위에는 다시 GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As (2 nm/2 nm) 층이 18번 반복된 초격자층, 두께 1.5 μm의 p-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 클래딩층, 그리고 오믹을 위한 두께 400 nm의 p<sup>+</sup>-GaAs 층이 순차적으로 성장되었다.

통상의 반도체 레이저 다이오드와 동일한 공정을 이용하여 양자점 레이저 다이오드를 제작하였다. 먼저 p<sup>+</sup>-GaAs를 식각한 후 클래딩층인 p-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As를 식각하여 mesa 구조를 만들었다. 이때 mesa의 폭은 5 μm가 되도록 하였다. 식각 깊이는 p<sup>+</sup>-GaAs로부터 0.6 μm인 것 (shallow mesa)과 2.0 μm인 것 (deep mesa) 두 종류로 하였다. 이

\* [전자우편] hikoel@kist.re.kr

p+ - GaAs ohmic layer	
p - Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As cladding layer 1500 nm	
GaAs/Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As (2 nm/2 nm) x 18 times	
GaAs space layer 38 nm	
InAs quantum dots	X 5 times
GaAs space layer 38 nm	
GaAs/Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As (2 nm/2 nm) x 18 times	
n - Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As cladding layer 1500 nm	
n+ - GaAs buffer layer 500 nm	
n+ - GaAs substrate	

Fig. 1. Schematics of InAs quantum dot epi-structure for laser diodes

후 절연막으로 SiN<sub>x</sub>를 약 0.3 μm 증착하고 리소그래피 공정을 통하여 식각되지 않은 p<sup>+</sup>-GaAs 층 위에 있는 절연막을 노출시키고 노출된 SiN<sub>x</sub> 절연막을 제거하여 p<sup>+</sup>-GaAs 층이 노출되도록 하였다. 노출된 p<sup>+</sup>-GaAs 층 위에 Ti/Pt/Au 금속을 각각 30 nm/30 nm/300 nm의 두께로 증착한 후 425 °C에서 1분간의 열처리를 통하여 p-오믹을 형성하였다. 다음으로 기판의 두께가 약 120-130 μm 되도록 연마한 후 AuGe/Ni/Au 금속을 각각 30 nm/30 nm/300 nm의 두께로 증착한 후 다시 385 °C에서 1분간의 열처리를 통하여 n-오믹을 형성하였다.

### III. 결과 및 논의

제작된 양자점 레이저 다이오드의 접합온도를 측정하기 위하여 순방향 전압-온도법을 이용하였다. 순방향 전압-온도법이란 순방향으로 인가된 다이오드의 전류-전압 특성에서 다이오드의 온도가 증가하면 전압이 낮아지는 특성을 이용하는 것이다. Fig. 2의 내부에는 측정온도 (heat-sink temperature)의 변화에 따른 양자점 레이저 다이오드의 전류-전압 특성을 나타낸 것이다. 측정온도가 증가 되면서 전압이 감소되는 현상을 볼 수 있다. 이때 전류는 펄스 폭 1 μs와 duty cycle 0.1 %인 펄스형태로 인가되었다. 이와 같은 특성의 펄스 전류는 레이저 다이오드내에서 접합온도의

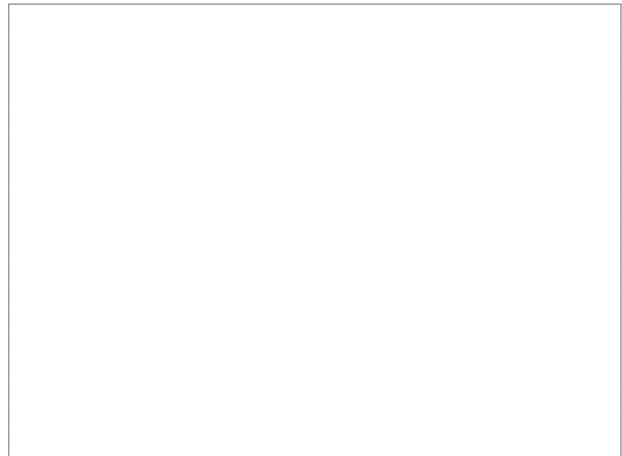


Fig. 2. Forward voltage versus heat-sink temperature for different pulsed injection current. Inset shows forward voltage versus current for several values of heat-sink temperature.

증가에 거의 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다 [7, 8, 14].

Fig. 2는 측정온도의 변화에 대한 순방향 전압의 변화를 인가된 전류의 대하여 나타낸 것으로서 Fig. 2의 내부에 삽입된 양자점 레이저 다이오드의 전류-전압 그림으로부터 유도된다. 측정온도에 대해서 순방향 전압이 선형적으로 감소하며 아래 식 (1)과 같이 표시 된다.

$$V_f = A + BT \tag{1}$$

여기에서 V<sub>f</sub>는 순방향 전압, T는 측정온도 이고, A와 B는 Fig. 2로부터 결정되는 상수이다. 인가전류가 100 mA 일 때 A와 B는 각각 1.23 V와 -1.4 mV/K로 얻어졌다. 한편 앞에서 언급한 바와 같이 펄스로 인가된 전류는 접합온도에 거의 영향을 주지 않으므로 식 (1)에서 펄스로 인가된 레이저 다이오드에서 접합온도 (T<sub>j</sub>)는 곧 측정온도 (T)라 할 수 있다. 따라서 식 (1)로부터 접합온도는 순방향 전압 V<sub>f</sub>와 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$T_j = (V_f - A)/B \tag{2}$$

여기에서 A와 B는 Fig. 2 또는 식 (1)로부터 구하여진 값이다. 식 (2)는 레이저 다이오드에 전류를 연속 (continuous wave: CW)으로 인가하면 그 연속전류에 의한 접합온도 (T<sub>j</sub>)가 증가 할 것인데 그 증가가 순방향 전압 V<sub>f</sub>의 값으로

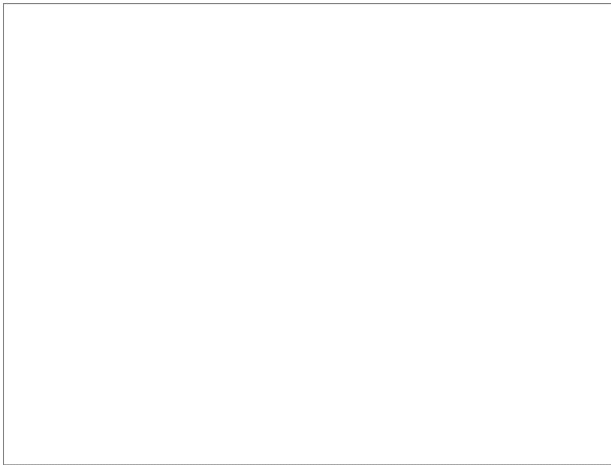


Fig. 3. Junction temperature increment relative to heat-sink temperature of 30 °C for shallow mesa of 0.6 μm and deep mesa of 2.0 μm.

나타남을 의미한다. 따라서 연속으로 동작된 레이저 다이오드의 순방향 전압을 측정하면 그 인가된 전류에 대한 접합온도가 측정될 것이다.

Fig. 3은 mesa의 깊이가 0.6 μm인 것과 2.0 μm인 ridge형 InAs 양자점 레이저 다이오드에 직류전류를 인가하였을 때 측정된 접합온도를 나타낸 것이다. 인가된 직류전류에 대하여 접합온도가 비교적 선형적으로 증가하고, mesa 깊이가 0.6 μm인 것에 비하여 2.0 μm일 때 접합온도의 증가가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 전류의 증가에 대한 접합온도의 선형성은 기존에 GaN LED 및 레이저 다이오드에서 발표된 결과와 유사하다 [7, 8]. 한편 mesa 깊이가 깊은 경우에 접합온도의 증가가 상대적으로 작은 것은 mesa의 측면으로 열 확산이 이루어졌기 때문이며 이에 대한 설명은 아래에 주어진다.

Fig. 4의 내부에는 제작된 InAs 양자점 레이저 다이오드의 CW 구동을 위하여 p-영역을 AuSn을 이용하여 Cu heat-sink에 접합한 것을 나타낸 것이다. 활성영역 내에서 발생한 열은 Cu heat-sink로 전도 (conduction)에 의하여 확산되거나 또는 측면방향의 solder material인 AuSn으로 확산된다. Mesa의 깊이가 작을수록 측면으로 확산되는 부분은 작고 대신 GaAs 또는 AlGaAs 층을 통하여 열이 확산될 것이다. 그러나 GaAs 또는 AlGaAs의 열전도도 (thermal conductivity)는 각각 44 W/mK와 11 W/mK 이어서 AuSn의 열전도도 57.3 W/mK보다 작아서 mesa의 깊이가 작을수록 활성영역에서 발생한 열이 효과적으로 제

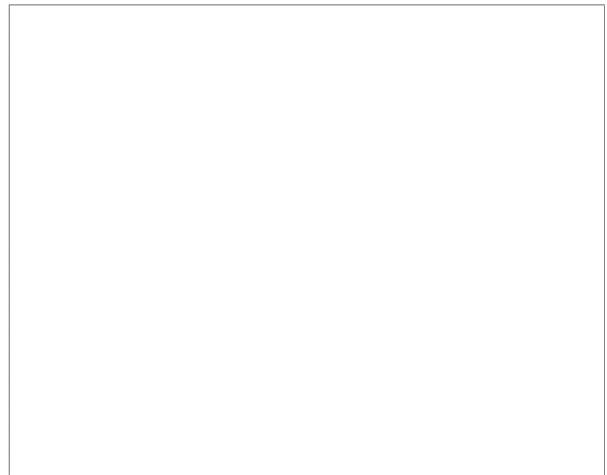


Fig. 4. Junction temperature variation as a function of mesa depth. Inset shows a schematic diagram of p-side down laser diode chip mounted on the Cu heat-sink.

거되지 못하게 된다. 반면 mesa의 깊이가 깊을수록 측면방향으로 열 확산되는 부분이 커지게 되고 이에 따라 열이 효과적으로 제거될 수 있게 된다. Fig. 4는 실험에 사용된 InAs 양자점 레이저 다이오드의 칩과 동일한 크기에서 0.4 A의 전류를 인가하였을 때 mesa의 깊이에 따라 접합온도가 감소되는 현상을 FEMLAB 프로그램을 이용하여 계산한 것이다. Mesa의 깊이가 0.6 μm에서 2.0 μm로 늘어나면서 접합온도가 약 5 °C 정도 더 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3에 실험적으로 측정된 0.4 A에서의 접합온도 차이 8.8 °C와 비교할 때 비교적 잘 일치하는 것으로 이해된다.

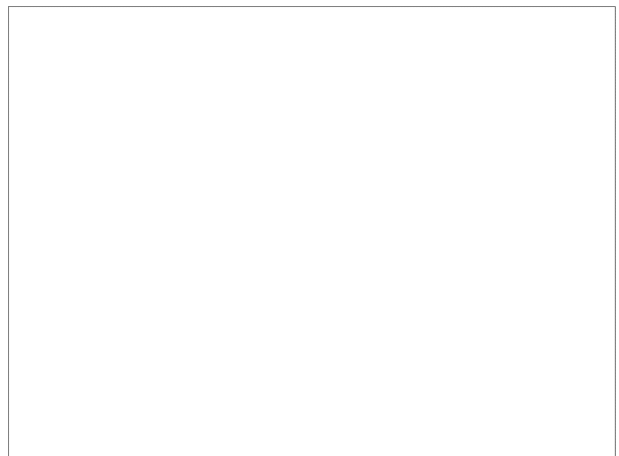


Fig. 5. Light-Current curves for the InAs quantum dot laser diodes with different mesa depths of 0.6 μm and 2.0 μm.

Fig. 5는 mesa의 깊이에 따른 InAs 양자점 레이저 다이오드의 광-전류 (light-current) 특성을 나타낸 것이다. Mesa의 깊이가 깊은 경우 문턱전류가 감소하고 동일한 전류값에서 광출력이 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 깊은 mesa에 의한 접합온도의 감소에 기인하기 때문으로 이해된다.

#### IV. 결 론

Mesa 깊이가 0.6  $\mu\text{m}$ 와 2.0  $\mu\text{m}$ 인 ridge 형 GaAs/InAs 양자점 레이저 다이오드를 제작하고 순방향 전압-온도법에 의하여 접합온도를 측정하였다. Mesa 깊이가 0.6  $\mu\text{m}$ 인 양자점 레이저 다이오드의 경우 직류전류 인가에 대하여 접합온도는 0.07 K/mA로 증가한 반면 mesa 깊이가 2.0  $\mu\text{m}$ 인 경우 접합온도는 0.05 K/mA의 비율로 증가함을 관측하였다. Mesa 깊이가 깊은 경우에 상대적으로 낮은 접합온도 증가는 mesa 측면으로의 열 확산 때문인 것으로 이해할 수 있었다. 제작된 양자점 레이저 다이오드의 광-전류 특성 측정 결과 mesa 깊이가 2.0  $\mu\text{m}$ 인 경우에 문턱전류가 낮아졌고, 광출력이 상대적으로 증가하였다. 이와 같은 결과는 mesa 측면으로의 열 확산에 의한 접합온도 감소 때문인 것으로 설명되었다.

#### 감사의 글

본 논문은 2008년 교육과학기술부의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. M60605000007).

#### 참고문헌

- [1] S. Todoroki, M. Sawai, and K. Aiki, *J. Appl. Phys.* **58**, 1124 (1985).
- [2] H. I. Abdelkader, H. H. Hausien, and J. D. Martin, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 2004 (1992).
- [3] S. Murata and H. Nakada, *J. Appl. Phys.* **72**, 2514 (1992).
- [4] W. Epperlein and G. L. Bona, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 3074 (1993).
- [5] D. C. Hall, L. Goldberg, and D. Mehuys, *Appl. Phys. Lett.* **61**, 384 (1992).
- [6] J. S. Manning, *J. Appl. Phys.* **52**, 3179 (1981).
- [7] Y. Xi and E. F. Schubert, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 2163 (2004).
- [8] H. Y. Ryu, K. H. Ha, J. H. Chae, O. H. Nam, and Y. J. Park, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 093506 (2005).
- [9] J. H. Jeong, K. C. Kim, J. I. Lee, H. J. Kim, and I. K. Han, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**, 1354 (2008).
- [10] D. L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O. B. Schekin, and D. G. Deppe, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **6**, 452 (2000).
- [11] H. Saito, K. Nishi, and S. Sugou, *Electron. Lett.* **37**, 1293 (2001).
- [12] 유영채, 한일기, 이정일, *한국진공학회지* **16**, 353 (2007).
- [13] 유영채, 이정일, 김경찬, 김은규, 김길호, 한일기, *한국진공학회지* **15**, 493 (2006).
- [14] Y. Xi, J. Q. Xi, T. Gessmann, J. M. Shah, J. K. Kim, E. F. Schubert, A. J. Fischer, M. H. Crawford, K. H. A. Bogant, and A. A. Alleman, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 031907 (2005).

## **Junction Temperature of Quantum Dot Laser Diodes Depending on the Mesa Depth**

Jung Hwa Jeong, Il Ki Han\*, and Jung Il Lee

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

(Received September 26, 2008, Revised October 21, 2008, Accepted November 9, 2008)

Junction temperature of quantum dot laser diodes is investigated by utilizing forward voltage-temperature method. In the case of ridge type laser diodes with deep mesa the increasing rate of junction temperature to current is about 0.05 K/mA, while in the case of shallow mesa the increasing rate is about 0.07 K/mA. It is explained that the relatively low increasing rate in the deep mesa results from the heat expansion to the lateral direction of mesa.

Keywords : Laser diodes, Quantum dots, Junction temperature

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