

## 반도체 레이저로 증펍하는 946 nm Nd:YAG 레이저의 출력 특성

박차곤<sup>†</sup> · 추한태 · 김규욱

금오공과대학교 자연과학부

Ⓣ 730-701 경북 구미시 양호동 1번지

(2007년 6월 7일 받음, 2007년 6월 20일 수정본 받음)

광섬유가 연결된 레이저 다이오드로 펌핑하는 Nd:YAG 레이저의 공진기 길이를 14 mm로 구성하고 펌핑광의 세기에 따른 946 nm Nd:YAG 레이저의 출력 특성을 조사하였다. 이때 이득 매질의 온도는 열전 냉각기를 이용하여 일정하게 유지시켰다. 그 결과 이득 매질의 온도를 낮게 유지할수록 더 강한 출력을 얻을 수 있었으며, 5°C에서 9.95 W로 펌핑할 때 최고 870 mW의 출력을 확인하였다. 출력저울의 반사율 변화에 따른 펌핑광의 발진 문턱값을 측정하여 0.23의 공진기 손실값을 얻을 수 있었다. 또한 펌핑광의 세기가 10 W 이상일 때 이득매질의 열적인 효과로 인한 출력의 감소 현상을 확인할 수 있었다.

주제어 : Diode-pumped lasers, Neodymium lasers, Solid-state lasers, Thermal effects

### I. 서 론

1964년 J. E. Geusic 등<sup>[1]</sup>에 의해 처음으로 발진에 성공한 Nd:YAG 레이저는 상온에서 230 μs의 형광수명(fluorescence lifetime)을 가지고 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 준위로부터 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>, 그리고, <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 준위로 천이하면서 그 중 일부가 각각 946 nm, 1064 nm, 1330 nm, 그리고 1800 nm 파장의 빛을 내놓는다. 바닥 상태의 대부분의 원자들이 들뜨게 되면 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 준위에서 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>와 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 준위로 천이될 확률은 0.25와 0.6이다. 따라서 총 들뜬 원자의 25%만이 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 준위로 떨어지면서 그중에 일부만이 946 nm의 형광을 내게 된다.<sup>[2]</sup> 유도방출 단면적 역시 1064 nm에 비해 약 9배 작은 4×10<sup>-20</sup> cm<sup>2</sup> 정도이다. 뿐만 아니라, 하위 준위는 바닥상태의 원자들이 열적으로 쉽게 들뜰 수 있어(Stark splitting: 857 cm<sup>-1</sup>) 강한 여기광의 흡수로 인해 발생하는 열을 효율적으로 냉각시켜야만 하는 전형적인 준 3 준위 레이저이다.

이것은 1064 nm의 발진가능성에 비해 946 nm를 발진시키는 것이 어렵다는 것을 의미한다. 하지만 반도체 레이저를 여기원으로 T. Y. Fan과 R. L. Byer<sup>[3]</sup>에 의해 최초로 구현된 후, 주파수 배가(frequency doubling)된 473 nm 청색레이저는 고밀도 광학저장매체, 고해상도 인쇄, 디스플레이, 의료장비, 그리고 해저통신 등 다양한 분야에 응용될 수 있다는 이점을 가지고 있으므로, 많은 연구자들의 거듭된 연구와 고출력 반도체 레이저의 개발로 출력과 효율 면에서 상당한 성과를 보이고 있는 실정이다.<sup>[4-9]</sup>

본 실험에서는 946 nm의 레이저 출력을 조사하기 위하여 이득매질이 부착된 알루미늄 마운트의 온도를 19°C에서부터 5°C까지 조절하였다. 또한 출력저울의 반사율을 달리하여 펌핑광의 세기에 따른 946 nm Nd:YAG 레이저의 출력 및 펌

핑광 세기의 발진 문턱치를 측정하여 레이저 출력의 기울기 효율과 공진기 손실값(cavity loss)을 각각 구하였다.

### II. 실험결과 및 논의

그림 1은 반도체 레이저로 증펍하고 946 nm에서 발진하는 Nd:YAG 레이저의 공진기 구조를 보여준다. 펌핑 레이저는 코어 지름이 400 μm, 개구수(numerical aperture, NA)가 0.22인 광섬유가 결합된 808 nm의 다이오드 레이저(fiber coupled LD, HLU32F400-808, Limo Laser System)를 사용하였으며 비구면 렌즈 조합(aspheric lens pair, f = 11.0 mm, NA = 0.25, AR coated at 600~1050 nm)을 통해 이득매질로 집속시켰다. Nd<sup>3+</sup>가 1.0 at.% 첨가된 직경 3 mm, 길이 5 mm인 이득매질 Nd:YAG 결정은 펌핑면(M<sub>1</sub>)이 808 nm와 1064 nm에 대해 고투과되고 946 nm에 대해서는 고반사되도록 코팅하였고, 다른 면은 946 nm에 대해 무반사 코팅하였다. 또한, 열접촉을 향상시키기 위해 인듐 포일로 감싼 다음 알루미늄으로 제작된 마운트에 장착하였다. 이때 마운트는 방열판이 부착된 열전 냉각기 위에 장착하고 온도조절기를 이용하여 19°C에서부터 5°C까지의 온도 조절이 용이하도록 하였다. 선형 공진기의 출력저울 M<sub>2</sub>는 이득이 높은 1064 nm에 대해 90% 이상 투과시키고 946 nm에 대한 반사율이 각

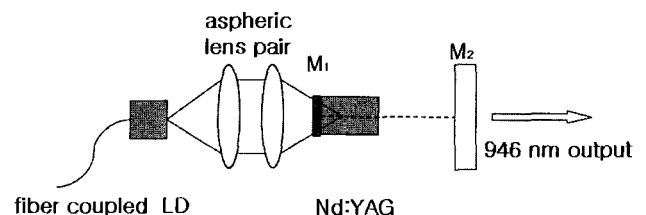


그림 1. 반도체 레이저로 증펍하는 946 nm Nd:YAG 레이저 장치.

<sup>†</sup> E-mail: cgpark@kumoh.ac.kr

각 97%, 95%, 90%, 그리고 85%인 네 종류의 평면거울을 사용하였다.

Nd:YAG 레이저의 발진 파장은 공진기의 길이가 14 mm일 때 출력거울에서 얻어지는 레이저 출력을 분광계(SpectraPro-750, Acton Research Systems)와 CCD array(Charge-Coupled Device array)를 이용하여 확인하였다. 그 결과, 그림 2에서와 같이 중심파장이 945.455 nm이고, 반치폭(FWHM)이 0.392 nm로 측정되었으며, 예상치와 약간의 차이가 있는 이유는 CCD array의 눈금정렬(calibration)이 엄밀히 지정되어 있지 않기 때문이며, 그 오차범위는 0.2% 내외이다.

그림 3에는 이득매질 마운트의 온도를 15°C로 유지시키고 공진기의 길이를 14 mm로 하여 앞서 언급된 반사율을 갖는 출력거울을 사용하여 946 nm 파장의 레이저 출력 특성을 나타내었다. 이 때 946 nm 레이저의 출력은 펌핑광의 세기가 7

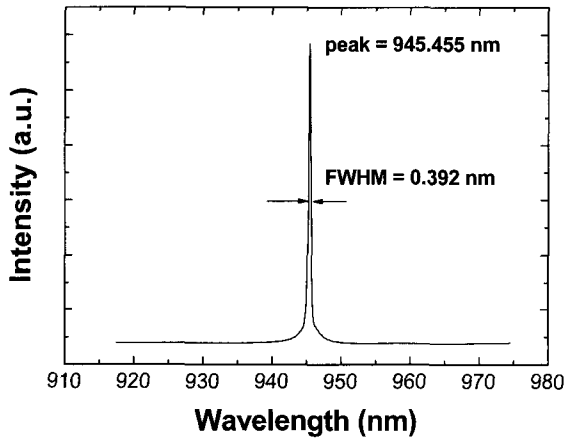


그림 2. Nd:YAG 레이저의 출력 파장과 반치폭.

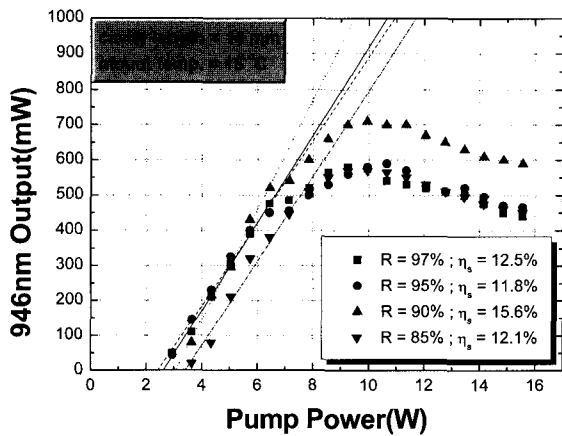


그림 3. 출력거울의 반사율(R)에 따른 946 nm 레이저 출력과 선형구간에서의 기울기효율(η<sub>s</sub>); 공진기의 길이는 14 mm 이고, 이득매질 마운트의 온도는 15°C로 유지시켰다. 선형 fitting에서 얻은 각각의 발진 문턱치는 반사율이 큰 순서대로 2.63 W, 2.43 W, 3.07 W, 그리고 3.42 W로 계산되었다.

W 근처에서 비선형적으로 증가하다가 10 W를 전후하여 감소하는 것을 볼 수 있었는데, 이는 여기광의 흡수로 발생된 열이 냉각되고 있는 이득매질 표면으로 확산되면서 공간적으로 불균일한 온도분포를 형성함으로써 생기는 열적인 효과로 인해 여기광의 세기가 증가할수록 공진기의 구조가 불안정해지는 것으로 판단된다. 선형적으로 출력이 증가하는 구간에서 각 출력거울에 대한 출력의 기울기효율은 반사율이 높은 순서대로 각각 12.5%, 11.8%, 15.6%, 그리고 12.1%로 측정되었다.

그림 4는 출력거울의 반사율을 달리하였을 때 실험적으로 측정된 펌핑광의 발진 문턱치를 나타낸 그래프이다. 이 그래프와 공진기 손실에 대한 식<sup>[10,11]</sup>으로부터 공진기의 손실을 구해본 결과 0.23을 얻을 수 있었다. 출력거울의 반사율 R, 발진문턱에서의 펌핑광의 세기  $P_{th}$ , 공진기의 손실 L, 그리고 K는 비례상수일 때 이들 사이의 관계식은  $-\ln R = 2KP_{th} - L$ 와 같이 주어진다.

그림 5는 네 종류의 출력거울 중에서 출력의 기울기효율이 제일 높은 반사율 90%인 거울을 이용하여 이득매질 마운트의 온도를 5°C, 10°C, 그리고 15°C로 변화시켰을 때의 출력 특성을 각각 나타내었다. 그림에서와 같이 이득매질 마운트의 온도가 5°C의 경우 선형적인 구간에서만 17.9%의 기울기 효율을 얻었으며, 9.95 W 펌핑에서 최대 870 mW의 출력을 얻을 수 있었다. 또한 이득매질 마운트의 온도가 높게 설정될수록 출력이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 바닥상태에 있는 원자들이 열적으로 들뜨게 될 확률이 높아지면서 펌핑의 효율을 떨어뜨리는 결과라 볼 수 있다.

그림 6에는 공진기의 길이를 14 mm로 유지하고, 펌핑광의 세기가 8.5 W일 때, 반사율 90%인 출력거울로 공진기를 구성한 다음 이득매질 마운트의 온도를 19°C에서 5°C까지 1°C 간격으로 변화시키면서 얻은 레이저 출력을 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이 바닥상태에 있는 원자들의 재흡수(reabsorption), 이득매질에서 발생하는 열적인 변형(thermal strain) 및 굴절률의 변화 등 다양한 원인에 의해 온도설정이 높아질수록 출력이 떨어지는 양상을 보인다.

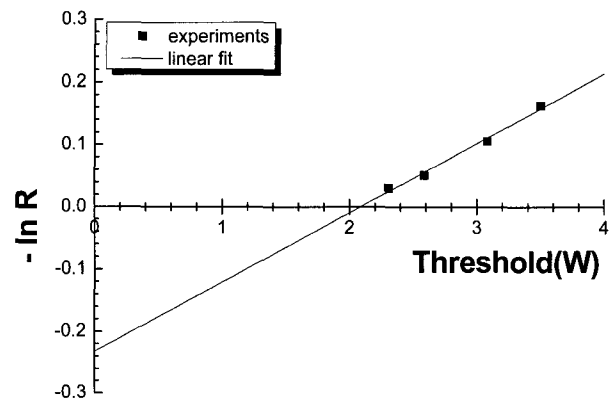


그림 4. 출력거울의 반사율을 달리하였을 때 실험적으로 측정된 발진 문턱치와 선형 fitting; 공진기의 길이는 14 mm이다.

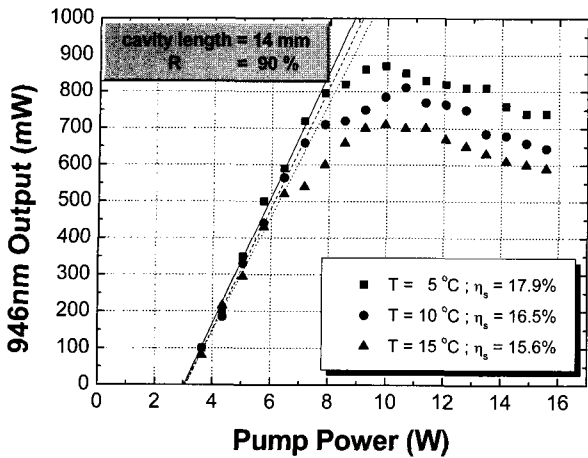


그림 5. 반사율(R) 90%인 출력거울에서 이득매질의 온도(T)에 따른 946 nm 레이저 출력과 선형구간에서의 기울기효율( $\eta_s$ ); 공진기의 길이는 14 mm이며, 선형 fitting의 결과 발진문턱치의 평균값은 3.02 W이다.

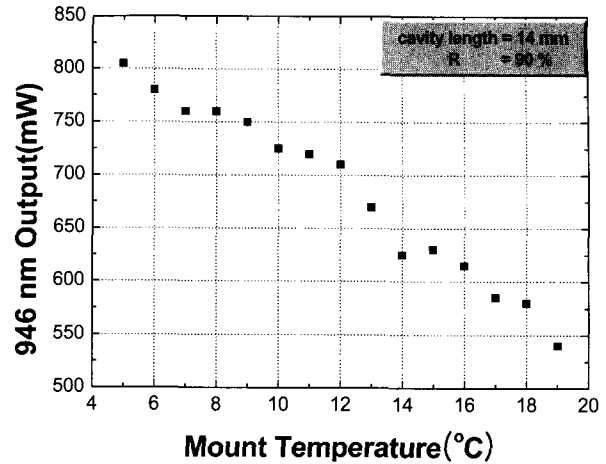


그림 6. 반사율(R) 90%인 출력거울에서 이득매질 마운트의 온도 변화에 따른 946 nm 레이저 출력특성; 공진기의 길이는 14 mm이고, 펌핑광의 세기는 8.5 W이다.

### III. 결 론

광섬유가 결합된 다이오드 레이저로 종펌핑하는 946 nm Nd:YAG 레이저를 구성하고, 펌핑광의 세기변화에 따른 출력을 측정하였다. 반사율이 90%인 출력거울을 이용하여 펌핑광의 세기가 9.95 W일 때, 870 mW의 출력을 얻었으며, 선형적인 변화 구간에서 최대 17.9%의 기울기효율을 얻을 수 있었다. 또한 이득매질의 온도를 낮게 유지할수록 보다 높은 출력과 낮은 발진 문턱치를 가짐을 확인할 수 있었으며, 반사율이 서로 다른 출력거울을 이용하여 공진기 손실값을 측정한 결과 0.23으로 측정되었다. 준 3준위 레이저의 근본적인 문제인 이득매질 내에서의 열적인 효과를 줄이는 공진기 설계와 더불어 비선형 결정을 이용한 주파수 배가로 얻을 수 있는 473 nm 청색광에 대한 연구는 현재 진행 중에 있다.

### 감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 2005년 학술연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

[1] J. E. Geusic, H. M. Marcos, and L. G. Van Uitert, "LASER OSCILLATIONS IN Nd-DOPED YTTRIUM ALUMINUM, YTTRIUM GALLIUM AND GADOLINIUM GARNETS," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 4, no. 10, pp. 182-184, 1964.  
 [2] T. Kushida, H. M. Marcos, and J. E. Geusic, "Laser Transition Cross Section and Fluorescence Branching Ratio for Nd<sup>3+</sup> in Yttrium Aluminum Garnet," *Phys. Rev.*, vol. 167, no. 2, pp. 289-291, 1968.

[3] T. Y. Fan and R. L. Byer, "Modeling and CW Operation of a Quasi-Three-Level 946 nm Nd:YAG Laser," *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. QE23, no. 5, pp. 605-612, 1987.  
 [4] W. A. Clarkson, R. Koch, and D. C. Hanna, "Room-temperature diode-bar-pumped Nd:YAG laser at 946 nm," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 10, pp. 737-739, 1996.  
 [5] C. Czeranowsky, E. Heumann, and G. Huber, "All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG-BiBO laser with 2.8-W output power at 473 nm," *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 6, pp. 432-434, 2003.  
 [6] R. Zhou, T. Zhang, E. Li, X. Ding, Z. Cai, B. Zhang, W. Wen, P. Wang, and J. Yao, "8.3 W diode-end-pumped continuous-wave Nd:YAG laser operating at 946-nm," *Opt. Expr.*, vol. 13, no. 25, pp. 10115-10119, 2005.  
 [7] Q. H. Xue, Q. Zheng, Y. K. Bu, F. Q. Jia, and L. S. Qian, "High-power efficient diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 457 nm blue laser with 4.6 W of output power," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 8, pp. 1070-1072, 2006.  
 [8] R. Zhou, E. Li, H. Li, P. Wang, and J. Yao, "Continuous-wave, 15.2 W diode-end-pumped Nd:YAG operating at 946 nm," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 12, pp. 1869-1871, 2006.  
 [9] H. Peng, W. Hou, Y. Chen, D. Cui, and Z. Xu, "Generation of 7.6-W blue laser by frequency-tripling of a Nd:YAG laser in LBO crystals," *Opt. Expr.*, vol. 14, no. 14, pp. 6543-6549, 2006.  
 [10] 추한태, 안범수, 김규옥, 이치원, "파장가변 티타늄 사파이어 레이저로 펌핑하는 연속발진 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 레이저의 출력 특성", *한국광학회지*, 13권, 2호, pp. 140-145, 2002.  
 [11] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 5th ed., (Springer-Verlag, Berlin, 1999), pp. 104-113.

## Output Characteristics of the Longitudinally Pumped 946 nm Nd:YAG Laser with Laser Diode

Cha Gon Park<sup>†</sup>, Han Tae Choo, and Gyu Ug Kim

*School of Natural Science, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 730-701, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: cgpark@kumoh.ac.kr*

(Received June 7, 2007, Revised manuscript June 20, 2007)

We have investigated the output characteristics of the 946 nm Nd:YAG laser which is longitudinally pumped by a fiber coupled laser diode. The temperature of a Nd:YAG crystal mount was kept constant by a controller with thermoelectric cooler. As a result, we measured more intense output at a low temperature, and then the maximum output power was measured to be 870 mW when the pumping power and the temperature were 9.95 W and 5°C, respectively. It appeared that output was decreased above 10 W pump power because of the thermal effects in gain medium.

OCIS code : 140.3480, 140.3530, 140.3580, 140.6810.