

## 레이저 다이오드로 펌핑되는 Nd:YLF 레이저의 발진 특성\*

강응철 · 이종무 · 남창희

한국과학기술원 물리학과

(1993년 7월 6일 받음)

파장 792 nm의 AlGaAs 레이저 다이오드로 펌핑되는 Nd:YLF 레이저를 제작하여 펌핑세기와 펌핑빔의 파장에 대한 출력특성을 조사하였다. Brewster 각으로 되어있는 Nd:YLF봉에서 발생하는 비점수차를 보정하기 위하여 공진기 구조를 접힌형태로 하였다. 연속 출력 2.6 Watt로 펌핑하였을 때 발진파장 1053 nm에서 최대 출력 1.1 Watt를 얻었으며, 이때 전체효율이 39% 였다.

### I. 서 론

연속발진 또는 Q-스위칭 모드로 동작되는 Nd:YAG나 Nd:YLF, Nd:glass 등 고체 레이저의 펌핑광원으로 Xe이나 Kr 섬광등이 많이 사용되어 왔다. 그러나 이러한 섬광등에서 발생하는 광은 스펙트럼이 넓어서 레이저 매질에 흡수되는 양이 8% 정도에 불과하므로 높은 펌핑효율을 기대하기가 어려우며, 고반복이나 연속발진시에는 펌핑 에너지의 많은 부분이 열로 방출되어 레이저 매질과 레이저 cavity를 가열시킨다. 일반적으로 Nd:YAG나 Nd:YLF와 같은 고체레이저는 원통형의 구조를 갖고 있으며, 주변에 냉각수를 순환시켜서 레이저 봉의 내부에 축적되는 열을 방출시킨다. 따라서 레이저 봉의 반경방향으로 온도 기울기가 형성되고, 또한 경사진 온도분포로 인하여 레이저 봉 내부가 압력을 받게된다.

레이저 봉 내부의 온도분포는 펌핑에너지와 흡수수스펙트럼, 냉각장치, 레이저봉의 열전달계수 등으로부터 계산할 수 있으며, 레이저 봉의 굴절율이 온도와 압력에 의존하기 때문에 공진기내를 진행하는 레이저 빔의 과면이 온도 분포에 따라 왜곡되는 현상이 발생한다. 또한 내부압력에 의한 굴절율 변화는 열복굴절 효과를 야기 시키면서 공진기의 내부손실을 증가시키는 효과를 준다. 이러한 열렌즈, 열복굴절 효과는 빔의 질이 좋고, 출력이 높은 고체레이저를 개발하는데 가장 큰 장애 요인으로

작용하고 있다.<sup>[1]</sup>

최근 반도체 레이저의 기술이 발달하면서 연속발진되는 수 Watt급의 반도체 레이저로 펌핑되는 고체 레이저들이 많이 연구되고 있다.<sup>[2,3]</sup> 특히 에너지 효율이 40% 이상 되는 양자우물구조의 반도체 레이저 array가 개발되면서 Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:glass, Nd:YAP 등과 같은 Nd-doped 레이저와 Er-glass, Ho:YAG 등과 같이 1.5 μm에서 2 μm 영역의 고체레이저를 펌핑하는데 반도체 레이저를 사용하고 있다. 800 nm 부근에서 흡수선을 갖는 Nd-doped 레이저들은 GaAlAs 레이저 다이오드로 펌핑을 하고, Er-glass 레이저는 870~1100 nm 범위의 발진선을 갖는 InGaAs 레이저 다이오드로 펌핑을 한다. 레이저 다이오드로 펌핑할 때는 고체레이저의 모양에 따라 레이저 봉의 뒷면이나 옆면에서 모두 펌핑 할 수 있으며, 현재 전체효율이 15% 이상을 보이고 있다. 기존의 섬광등으로 펌핑되는 고체레이저가 1% 수준임을 고려할 때 매우 높은 효율이며, 따라서 열로 인한 문제를 상당히 해결할 수 있다.

GaAlAs 레이저 다이오드는 발진파장이 약 0.3 nm/°C의 온도 의존성을 갖고 있어서, 발진 파장을 Nd 레이저의 최대 흡수선에 일치시키기 위하여 온도 조절과 안정화 장치를 사용한다. 또한 반도체 소자이므로 기체를 사용하는 섬광등보다 매우 긴 수명을 갖고 있다.

본 논문에서는 CW 3 Watt의 GaAlAs 레이저 다이오

\* 본 연구는 국방과학연구소 기초연구의 일부 지원에 의한 것임.

드로 펌핑되는 Nd:YLF 레이저를 제작하고, 레이저 다이오드의 전류, 발진파장에 대한 Nd:YLF 레이저의 출력특성을 조사하였다.

## II. Nd:YLiF<sub>4</sub> 특성

Nd:YLF는 단축결정 구조를 갖고 있으며, 레이저 봉내부에서의 편광에 따라 1047 nm와 1053 nm의 두 가지 파장으로 발진한다. 레이저빔의 편광이 c-axis에 대해 수직인 경우 1053 nm, c-axis와 평행인 경우에는 1047 nm로 발진한다. 1053 nm는 고체 레이저 증폭기로 가장 널리 사용되고 있는 Nd:phosphate glass의 최대 이득파장인 1054 nm와 잘 일치하기 때문에 Nd:phosphate glass 증폭기의 첨두 공진기로 매우 적합하다.

Nd:YLF의 흡수 스펙트럼은 그림1에서 보듯이 785 nm~810 nm 사이에서 주로 흡수가 일어나며, 펌핑빔의 편광에 따라 다른 특성을 보인다. GaAlAs 레이저 다이오드 펌프빔이 Nd:YLF의 c-axis와 평행인  $\pi$ -편광일 때는 최대흡수 파장이 792 nm, 1% doping에 대해 흡수계수가  $14 \text{ cm}^{-1}$ 이고,  $\sigma$ -편광(c-axis와 수직)일 때는 최대흡수 파장이 797 nm, 흡수계수가 약  $3 \text{ cm}^{-1}$ 이다.

Nd:YLF의 유도복사 단면적도 역시 편광에 따라서 각각  $1.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ( $\pi$ -편광, 1047 nm)와  $1.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  ( $\sigma$ -편광, 1053 nm)이고, 1053 nm의 경우 Nd:YAG의  $2.4 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 에 비해 절반정도의 값을 갖고있다. 그러나 Nd:YLF의 윗준위 수명은  $480 \mu\text{s}$ 로 Nd:YAG의  $230 \mu\text{s}$ 보다 두 배 이상 길어서 연속발진시 문턱 에너지가 낮다.

고체레이저를 고반복이나 연속동작시 열렌즈 효과가 매우 심각하게 일어난다. 열렌즈효과는 온도에 의한 굴절율 변화  $dn/dT$ 와 열 stress에 의한 굴절율 변화, 열팽창에 따른 레이저 봉의 곡율변화 등의 영향을 받는데

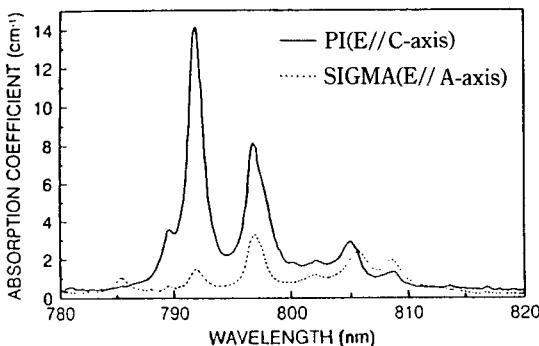


그림 1. Nd:YLF의 흡수 스펙트럼.

이중 온도에 의한 굴절율 변화의 영향을 가장 크게 받는다(75%, Nd:YAG). Nd:YLF의 경우  $dn/dT$ 가 Nd:YAG의 30% 정도이고 음의 값을 갖기 때문에 열 stress와 열팽창에서 발생하는 효과와 상쇄되어 열렌즈 효과가 매우 적게 나타난다.<sup>[5]</sup> 또한 자신이 갖고 있는 복굴절 값이 열에 의해 발생된 복굴절보다 커서 열복굴절 효과를 무시할 수 있기 때문에 연속발진시 레이저 발진에 미치는 열의 효과가 상대적으로 적다. 따라서 Nd:YLF는 중간 출력의 Q-스위칭 레이저나 반복율이 높은 재생 증폭기로도 적합하다.<sup>[6]</sup>

## III. 실험장치

연속발진 Nd:YLF 레이저의 전체적인 실험장치도는 그림 2와 같다. 펌핑용으로 사용된 GaAlAs 레이저 다이오드(LD)는 상온에서 발진파장이 797 nm인 Spectra Diode Lab.의 SDL-2482-P1(3 W CW)이고, 별도의 LD driver(SDL-820)로 구동하였다. LD의 발진파장은 온도에 따라  $0.3 \text{ nm}/\text{C}$ 로 변하는 특성을 갖고 있으므로, LD driver에 내장되어 있는 thermo-electric(TE) 온도 조절장치로 발진파장을 조절할 수 있다.

LD의 발광 면적은  $500 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ , 광발산각은 수직 방향으로  $40^\circ$ , 수평으로  $10^\circ$ 이다. 이러한 범특성을 갖는 LD로 효과적인 펌핑을 하려면 레이저 봉의 end mirror 면에서 공진기 모드 크기와 펌프빔의 크기를 일치시켜 주어야 한다. 이를 위하여 높은 numerical aperture를 갖는 렌즈(L1, NA=0.65, efl=6.5 mm)와 cylindrical 렌즈 (efl=100 mm), half-wave plate, spherical 렌즈(efl=25 mm)로 구성된 펌핑 광학계를 제작하였다. 그림2의 장치도 평면을 yz-평면으로 보면, xz-평면 상에서 LD 광

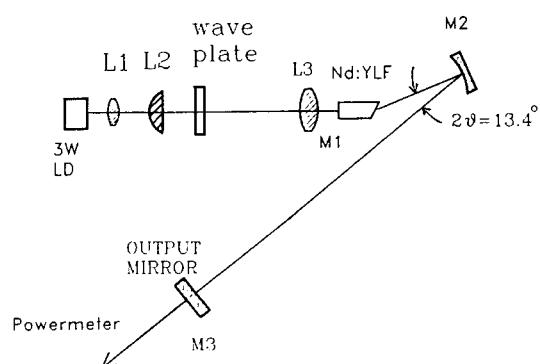


그림 2. 레이저 다이오드로 펌핑되는 Nd:YLF레이저의 실험장치.

원은 크기가  $1\text{ }\mu\text{m}$ 이므로 점광원으로 볼 수 있다. 따라서 collimating 렌즈로 평행광을 만들면 집속렌즈로 레이저 봉의 end mirror면에 쉽게 집속할 수 있다. 그러나 yz-평면에서는 LD 광원 크기가  $500\text{ }\mu\text{m}$ 이므로 collimating 렌즈와 집속 렌즈 사이에 cylindrical 렌즈를 삽입하여 결상광학계를 제작하였으며, 펌핑빔이 레이저봉 뒷면에 모일 때 빔의 크기는 약  $300\text{ }\mu\text{m}$ 이다. Half-wave plate는 펌프빔의 편광을  $90^\circ$  회전시켜서 Nd:YLF 레이저 봉의 c-axis와 평행이 되도록 함으로써 흡수가 잘 일어나게 하기 위한 것이다. LD 광원으로부터 collimating 렌즈까지의 거리는 6.5 mm, cylindrical렌즈까지는 106.5 mm, 집속렌즈까지는 772.5 mm이다.

Nd:YLF 레이저 매질은 직경 4 mm, 길이 10 mm의 봉으로 한면이 평면이고 다른면은 Brewster 각으로 연마되었으며, 1053 nm의 레이저 파장이 발진되도록 Nd:YLF 결정의 c-axis가 레이저광의 편광과 수직( $\sigma$ -편광)이 되도록 하였다. 레이저봉의 한 면은 797 nm에서 최대 투과, 1053 nm에서는 최대로 반사가 되도록 다층코팅을 하여 레이저 다이오드의 펌핑빔이 잘 투과하고 동시에 레이저 공진기의 end mirror 역할을 하도록 하였다. 일 반적으로 연속발진 고체레이저에는 냉각장치가 필요하나, 본 실험에서는 별도의 냉각장치없이 열전도도를 높이기 위하여 레이저봉을 인듐박막으로 감싼 후, 알루미늄으로 만든 지지대로 레이저 봉을 고정하였다. 알루미늄 지지대는 다시 펌프빔과 공진기의 미세조정을 위하여 3 축조정이 가능한 xyz-mount에 고정하였다. 레이저 봉의 Brewster 면에서 발생하는 비점수차를 보정하기 위하여 곡율반경 474 mm인 거울로 접힌구조의 공진기를 구성하였다. 이러한 공진기 구조에서 비점수차가 보정되려면 folding mirror의 각도가 아래의 식을 만족하여야 한다.<sup>[7,8]</sup>

$$2t(n^2-1)\sqrt{n^2+1}/n^4 = R \sin\theta \tan\theta \quad (1)$$

1053nm에서 Nd:YLF의 굴절율이  $1.45^\circ$ 이고, 레이저 봉의 Brewster 면에 대해 수직방향으로 재질 두께  $t$ 가 7.4 mm, folding mirror의 곡율반경  $R$ 는 474 mm이므로, 윗 식으로부터  $\theta$ 를  $6.7^\circ$ 로 하였다.

이와같이 접힌공진기는 초점거리가  $R/2$ 인 thin lens를 포함한 공진기로 생각할 수 있다. 이때 공진기의 g-parameter는 아래와 같이 표현된다.<sup>[9,10]</sup>

$$g_1 = 1 - L_2/f - L_0/R_1, \quad (2)$$

$$g_2 = 1 - L_1/f - L_0/R_2, \quad (3)$$

단,  $f=R/2$ ,  $L_0=L_1+L_2-(L_1L_2/f)$ ,  $L_1$ 은 end mirror에서

thin lens 사이의 거리,  $L_2$ 는 출력경과 thin lens 사이의 거리이다.

공진기를 이루는 end mirror와 출력경에서 각각의 TEM<sub>00</sub> mode 크기는 다음과 같이 표현된다. 여기서  $\omega_1$ 은 end mirror 면에서 TEM<sub>00</sub> 모드의 반경,  $\omega_2$ 는 출력경면에서 TEM<sub>00</sub> 모드의 반경을 나타낸다.<sup>[10]</sup>

$$(\pi\omega_1^2/\lambda L)^2 = \frac{g_2}{g_1(1-g_1g_2)}, \quad (4)$$

$$(\pi\omega_2^2/\lambda L)^2 = \frac{g_1}{g_2(1-g_1g_2)}, \quad (5)$$

여기서  $L=L_1+L_2$ 이다.

윗 식으로부터 레이저 안정조건을 만족하고 거울 M1에서 beam 크기가 펌프빔과 일치시켜주기 위해서 레이저봉의 Brewster면과 folding mirror 사이의 거리를 260 mm, 공진기 길이를 150 cm로 하였다.

#### IV. Nd:YLF 레이저의 발진 특성

레이저 다이오드의 동작온도와 구동전류에 따라 발진 파장이 변하는 양을 조사하였다. LD driver에 내장된 TE-cooler로 온도를 조절하고, 정밀도가 0.1 nm인 광 spectrum analyser(ANRITSU Inc., MS9030A)로 발진파장을 측정하였다. 3가지 구동전류에 대하여 온도를 10 °C에서 25°C 까지 높이면서 발진 파장을 측정한 결과를 그림 3에 보여주고 있다. 전체 측정구간인 15°C 범위내에서 0.25 nm/C의 기울기를 갖고 선형적으로 발진파장이 증가하고 있으며, 구동전류가 1 A 증가할 때 발진

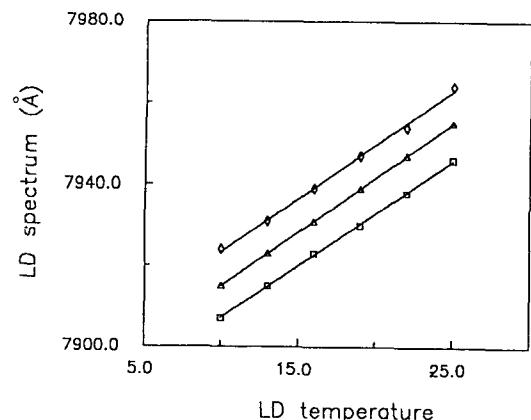


그림 3. LD 구동온도에 따른 LD 발진 파장변화  
구동전류: 2A(○), 3A(△), 4A(□).

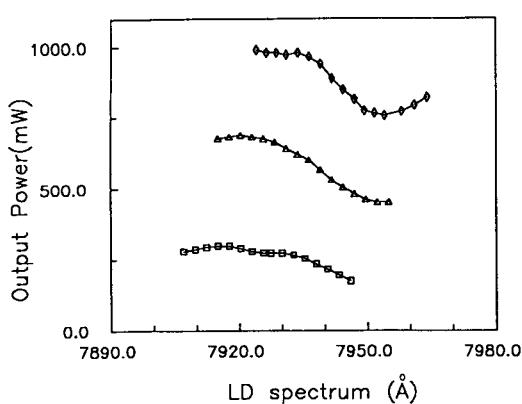


그림 4. LD 펌핑파장에 따른 Nd:YLF 레이저 출력 특성.  
펌핑세기: 1W(□), 2W(△), 3W(◇).

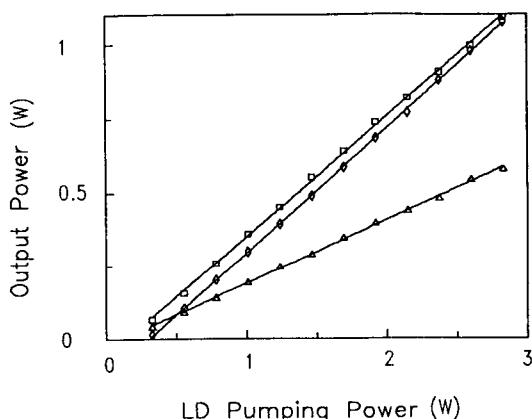


그림 5. LD 펌핑세기에 따른 Nd:YLF 레이저 출력 특성.  
출력경 반사율: 98%(△), 94%(□), 85%(◇).

파장이 0.8 nm 증가하고 있음을 알 수 있다.

Nd:YLF 레이저 공진기의 출력경 반사율을 94%로 고정하고, LD 펌프빔의 세기와 파장에 따른 출력변화를 조사하였다. 펌프빔의 세기를 1 W, 2 W, 3 W 등 3가지로 하고, 펌프파장을 변화시키면서 1053 nm 출력변화를 측정한 결과가 그림4이다. 전체적으로 Nd:YLF의 흡수가 최대인 792 nm에서 최대출력을 보이고 있으며, 펌프파장이 795 nm에서 최저로 떨어진 후 파장이 증가함에 따라 다시 출력이 증가하는 것은 Nd:YLF의 흡수 스펙트럼과 일치하는 결과를 보여주고 있다.

그림 5는 출력경의 반사율을 98%, 94%, 85%로 바꾸었을 때, 각각에 대하여 LD 펌핑세기에 따른 Nd:YLF 레이저의 출력 특성을 측정한 결과이다. 각각의 펌핑세

기를 증가시킬 때마다 레이저 다이오드의 동작온도를 조절하여 출력이 최대가 되도록 하였다. 반사율이 94%이고, 펌핑세기가 2.8 W일 때 별도의 냉각장치 없이 최대 연속 출력 1.1 W를 얻었으며, 이때 전체효율이 39%, slope 효율은 41%였다.

## V. 결 론

레이저 다이오드로 펌핑되는 Nd:YLF 레이저를 제작하고 펌프빔의 파장과 펌핑세기에 따른 출력특성을 조사하였다. 비접수차를 제거하기 위하여 공진기를 접힌 구조로 하고, 펌핑효율을 높이기 위하여 펌프빔의 크기와 공진기 end mirror인 레이저 봉 뒷면에서 공진모드의 beam waist 크기를 최대한 일치시켰다. 레이저 다이오드 동작온도를 조절하여 펌프빔의 파장을 Nd:YLF 흡수 스펙트럼의 중심과 일치하도록 하여, 펌핑세기가 2.8 W에서 최대 연속 출력 1.1 W를 얻었다. 이때의 레이저 발진 효율은 39%, slope 효율은 41%였다. 이러한 효율은 일반적인 섬광등 펌핑으로는 기대할 수 없는 효율이며, 레이저 다이오드로 펌핑하는 고체 레이저 중에서도 높은 효율을 보여주고 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] W. Koechner, *Appl. Opt.* **9**, 2548 (1970).
- [2] D. W. Hughes and J. R. M. Barr, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **25**, 563 (1992).
- [3] R. A. Utano and D. A. Hyslop, *SPIE* **1223**, 128 (1990).
- [4] T. H. Allik, W. W. Hovis, D. P. Caffey, and V. King, *Opt. Lett.* **14**, 116 (1989).
- [5] T. M. Pollak, W. F. Wing, P. J. Grasso, E. P. Chiciklis, and H. P. Jenssen, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-18**, 159 (1982).
- [6] J. E. Murry, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-19**, 488 (1983).
- [7] M. Gifford and K. J. Weingarten, *Opt. Lett.* **17**, 1788 (1992).
- [8] 이종무, 강웅철, 남창희, *한국광학회지* **3**, 222 (1992).
- [9] H. W. Kogelnik, E. P. Ippen, A. Dienes, and C. V. Shank, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-8**, 373 (1972).
- [10] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 3rd Ed., Springer-Verlag (1992).

## CW Operation of LD-pumped Nd - YLF Laser -

Eung Cheol Kang, Jong Moo Lee and Chang Hee Nam

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology  
Taejon 305-701, Korea*

(Received: July 6, 1993)

A Nd:YLF laser pumped by a CW GaAlAs laser diode(LD) at 792 nm has been designed and fabricated. The output power was investigated as a function of LD spectrum and pump power. A folded laser resonator was desinged to compensate for the astigmatism produced at the Brewster surface of Nd:YLF rod. We obtained output power of CW 1.1 Watt when the pumping power was 2.8 Watt and the output wavelength of LD was temperature tuned to the peak absorption line of Nd:YLF. The overall efficiency was 39 % and slope efficiency was 41 %.