

Fiber-coupled diode 로 펌핑된 Nd:YVO₄ 레이저의 출력특성 연구

Investigation on the output characteristics of Nd:YVO₄ laser pumped by fiber-coupled diode laser

LG 산전 레이저팀 이종문, 권순창, 엄기영, 한기관

I. 서론

종래에 산업계의 레이저 응용 분야에는 고출력의 CO₂ 레이저나 Nd:YAG 레이저를 이용한 레이저 용접 및 절단이 주를 이루었으나, 최근에는 정밀을 요구하는 전자부품 업계 및 각종 정밀 가공 분야에 레이저의 응용이 확대되면서 평균 출력 10 W 전후의 안정성(stability)이 뛰어나고 빔의 집적도가 높은 소형 고체 레이저가 빈번히 사용되고 있다. 집적도가 높은 빔을 얻기 위해서는 레이저의 기본 모드인 TEM₀₀ 모드가 발진 되도록 하는 것이 중요하며 이를 위해서 다이오드 레이저를 써서 공진기의 길이방향으로 고체 이득 매질을 펌핑하는 방법이 많이 사용되고 있다. 펌핑 용으로 사용되는 다이오드 레이저는 발광 단면 1 μm × 1 cm 의 막대 형태가 주로 사용되며, 효율적인 펌핑을 위해서 미세 렌즈를 비롯한 특수한 광학계를 사용해서 레이저 발진 모드와 펌핑 빔이 최대한 일치되도록 집광하여 직접 펌핑하거나 광섬유로 빛을 유도해서 펌핑하는 방법이 사용되고 있다.

산업용 고체 레이저의 이득 매질로는 Nd:YAG 및 Nd:YLF 그리고 Nd:YVO₄ 등이 많이 사용되며, 표 1 에서 보는 바와 같은 각각의 특성에 따라서 이들을 매질로한 레이저는 다소 다른 특성을 보인다[1,2]. 가장 많이 사용되고 있는 Nd:YAG 는 Nd:YVO₄ 보다는 작지만 Nd:YLF 보다는 큰 유도 방출 단면적을 갖고 있으므로 비교적 쉽게 발진되며, 열전도 성이 가장 뛰어나고 상대적으로 크기의 제한이 적어서 저출력에서 고출력까지 다양하게 사용되고 있다. Nd:YLF 는 복굴절 매질로서 편광에 따라서 흡수 및 유도 방출 단면적 그리고 파장이 다르다. Nd:YLF 는 Nd:YAG 에 비해서 유도 방출 단면적이 작고 열전도성과 용융점이 낮은 단점이 있지만 복굴절 매질이고 음(-)의 온도에 따른 굴절률 변화 상수를 갖고 있어서 열 복굴절 및 열 렌즈의 문제가 적다는 장점을 갖고 있으며, 형광 수명이 길어서 상대적으로 높은 펄스 당 에너지를 얻을 수 있다. 따라서, Nd:YLF 는 연속 발진에 응용되기 보다는 고 에너지 펄스 출력으로 응용되는데 유리하다. 역시 복굴절 매질인 Nd:YVO₄ 는 다른 두 매질에 비해서 흡수율과 유도 방출 단면적이 가장 커서 낮은 펌핑 에너지에서도 쉽게 발진되는 장점을 갖고 있으나, 열전도 성이 Nd:YAG 에 비해서 떨어지고 크기에 제한이 있으며 형광 수명이 짧기 때문에 10 W 전후의 연속 출력이나 고 반복율의 펄스 동작에 적합하다.

본 실험에서는 10 W 전후의 출력에 적합한 Nd:YVO₄ 매질을 광섬유로 유도된 다이오드 레이저로 펌핑해서 연속 출력 및 큐스위칭된 출력 특성을 조사하였다.

II. 실험

실험 장치는 그림 1 과 같다. 약 1%의 Neodymium 이 첨가된 길이 6 mm 의 Nd:YVO₄ 에 두 개의 파장이 808 nm 이고 출력이 12 W 인 광섬유로 유도된 다이오드 레이저 빔이 펌핑원으

로 사용되었으며 효율적인 펌핑을 위해서 렌즈로 이득 매질에 집속되었다. 반사율 90%의 출력 경과 다른 한쪽 거울 사이의 길이는 약 28 cm 이며 공진기의 중앙에 이득 매질이 위치하고 큐스위칭을 위한 음향변조 큐스위치가 공진기 내에 설치 되었다. 이득 매질과 큐스위치는 열전도로 냉각되며 다이오드 레이저도 물을 사용하지 않고 온도를 조절하여 전체 적으로 물이 사용되지 않는 완전 고체 장치를 구성하였다.

그림 2는 펌핑 파워에 따른 레이저 출력의 변화를 보여준다. 그림과 같이 약 2.2 W의 펌핑 파워에서 발진이 시작되 기울기 효율 약 45%로 출력이 증가하여 최대 10.1 W의 출력을 보여서 약 41%의 변환 효율을 보였다. 출력 spectrum을 관찰한 결과 발진 중심 파장은 약 1064.4 nm 이었다. 레이저는 비교적 낮은 출력에서는 TEM₀₀ 모드만 발진하였으나 점차로 펌핑 파워가 증가하면서 TEM₀₁ 모드와 TEM₁₀ 모드가 발진하였다. 각 모드의 M² 값을 측정한 결과 TEM₀₀ 모드의 M² 값이 약 1이었으며 TEM₀₁ 및 TEM₁₀ 모드는 약 2-4의 값을 보였다. TEM₀₀ 모드 외에 다른 모드가 발진하는 이유는 펌핑 빔이 TEM₀₀ 모드보다 큰 공간적 분포를 갖고 있기 때문으로 보이며, 이러한 상태에서 공진기 내에 핀홀을 설치하여 그림 3과 같이 TEM₀₀ 모드만을 발진하도록 한 경우에 TEM₀₀ 모드의 최대 출력은 약 5 W 이었다. TEM₀₀ 모드의 출력을 더욱 증가하기 위해서는 펌핑 빔과 레이저 모드와의 결합을 개선하여야 할 것으로 보이며 현재 이 실험을 계속해서 진행중이다.

그림 4는 공진기 내의 큐스위치를 구동하여 큐스위칭된 출력 신호로서 핀홀이 없는 상태에서 50 kHz로 동작할 때의 최대 평균 출력은 약 8 W 이고 펄스 폭은 약 90 ns 이었으며 최대 출력에서는 TEM₀₁ 모드로 발진하고 펌핑 파워를 줄이면 약 4.5 W의 TEM₀₀ 모드 발진이 가능하였다. 레이저의 평균출력 안정도는 ±1% 이내이고 펄스의 peak to peak 안정도는 ±2% 이내였다.

III. 논의

다이오드 레이저로 Nd:YVO₄ 레이저를 공진기 길이 방향으로 펌핑한 결과 비교적 낮은 파워에서 발진이 시작되었으며 에너지 변환 효율도 41%로 상당히 높음을 알 수 있었다. 미세 가공에 응용되기 위해서는 TEM₀₀ 모드 만으로 발진하는 것이 유리하나 위 실험에서는 펌핑 빔과 레이저 모드의 공간 분포가 일치하지 못해서 상위 모드가 함께 발진하였으며 이는 지속적인 실험을 통해서 개선될 것이다. 큐스위칭된 레이저 출력은 비교적 안정된 출력을 보였으며 특히 50kHz의 고 반복율에서도 펄스들이 안정되게 발진해서 Nd:YVO₄ 레이저는 고 반복율 펄스로서의 응용에 장점이 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

광섬유로 유도된 다이오드 레이저로 펌핑된 Nd:YVO₄ 레이저의 연속 발진 실험을 수행하였다. 다이오드 및 Nd:YVO₄ 그리고 큐스위치의 냉각에는 물이 사용되지 않아서 완전 고체 장치로 구성하였다. 레이저는 약 2.2 W의 펌핑 파워에서 발진이 시작되 기울기 효율 약 45%로 출력이 증가하여 최대 10.1 W의 출력을 보여서 약 41%의 변환 효율을 보였다. 공진기 내에 핀홀을 삽입했을 때 TEM₀₀ 모드의 최대 출력은 약 5 W 이었으며, 이때의 M² 값은 1에서 크게 벗어나지 않았다. 약 50 kHz로 큐스위칭 되었을 때의 최대 평균 출력은 8 W 이고 펄스폭은 90 ns 이며, 평균 출력의 안정도는 ±1% 이내 peak to peak 안정도는 ±2% 이내였다. 앞으로의 실험

에서는 펌핑 빔과 TEM₀₀ 모드의 결합 효율을 향상시켜서 TEM₀₀ 모드 출력을 향상시키는 연구가 진행될 것이다.

V. 참고 문헌

1. W. Köechner, "Solid-state Laser Engineering." 4th ed. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996).
2. "Electronic Catalog," (VLOC, <http://www.vloc.com>).

Table 1 Properties of Nd doped material.

Property	Nd:YAG Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Nd:YLF Nd:LiYF ₄	Nd:YVO ₄
Lasing wavelength (nm)	1064	1053(σ) 1047(π)	1064.3(π)
Index of Refraction	1.82	$n_o=1.4481$ $n_e=1.4704$	$n_o=1.958$ $n_e=2.168$
Fluorescent lifetime(μ s)	230	480	100
Stimulated emission cross-section (cm ²)	6.5×10^{-19}	1.2×10^{-19} (σ) 1.8×10^{-19} (π)	15.6×10^{-19} (π)
Thermal conductivity(W/cm-K)	0.14	0.06	0.05
Melting temperature(°C)	1970	819	1810-1940
dn/dT	$7.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	$-2.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (σ) $-4.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (π)	$8.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (σ) $3.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (π)
Peak absorption coefficient (cm ⁻¹)	$\alpha=7.1@808$ (0.85% doped)	$\alpha=3.59@797$ (σ) $\alpha=10.8@792$ (π) (1.2% doped)	$\alpha=10.5@808$ (σ) $\alpha=40.7@808$ (π) (1% doped)
Knoop hardness(kg/mm ²)	1215	300	480

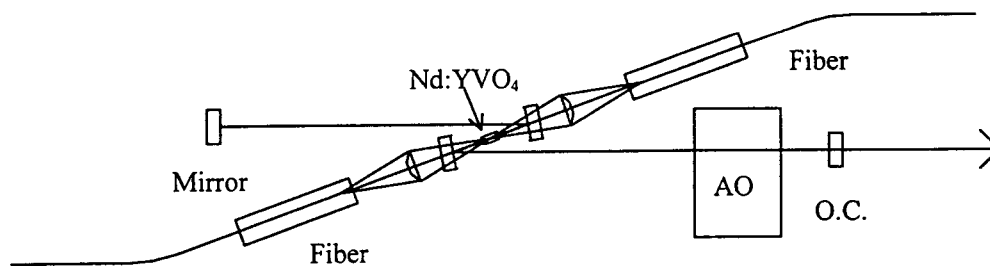


Fig. 1 Experimental setup of Diode-pumped Nd:YVO₄ laser.

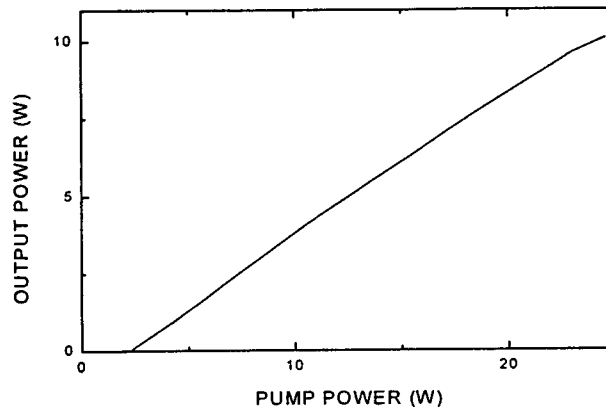
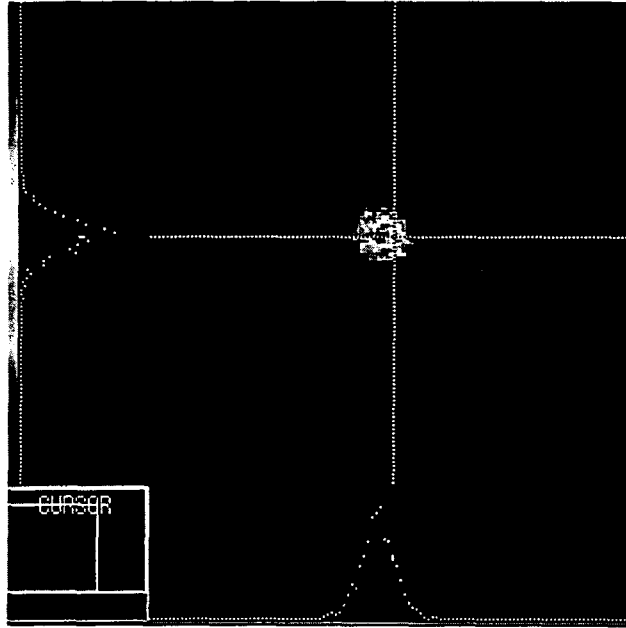


Fig. 2 Output power from Nd:YVO₄ laser at different pump power.



□ Fig. 3 The beam pattern of output from Nd:YVO₄ laser.

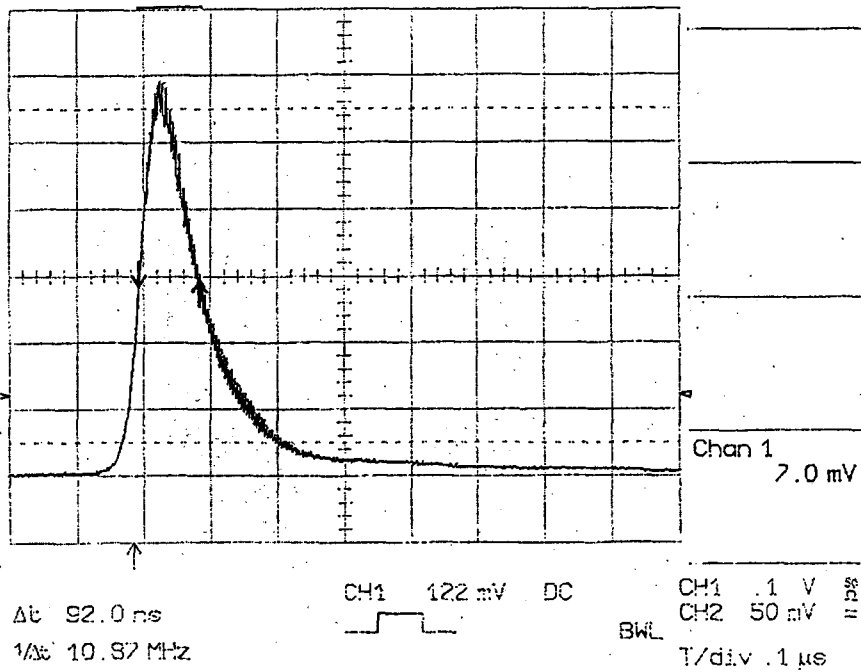


Fig. 4 The Q-switched pulse from Nd:YVO₄ laser.