Micro-Chip Yb:YAG 레이저의 발진 특성

Output Charateristics of an End-Pumped Micro-Chip Yb:YAG Laser

임 창 환
(Changhwan Lim*)

Abstract

입사면에서 발생하는 열을 효율적으로 제거하기 위하여 Yb:YAG 결정의 표면에 sapphire 창을 부착하여 레이저를 발진 시켰다. Yb:YAG 결정에서 발생하는 열이 sapphire 창을 통하여 구리판으로 전달되는 경우와 Yb:YAG 결정의 측면에서 냉각하는 경우의 레이저 출력을 측정하여 각각의 레이저 발진 특성을 비교하여 보았다.

여기면을 sapphire 창으로 냉각하는 micro-chip Yb:YAG 레이저의 레이저 에너지 전환 효율은 38%였으며 레이저 발진 문턱값은 4 kW/mm^2, slope efficiency는 56%로 측정되었다. Sapphire 창을 사용하는 경우 표면에서의 열전달도는 10 W/mm^2 이상으로 관측되었다. Yb:YAG의 도핑율, 출력경의 반사율 등을 레이저 변수를 최적화할 경우 같은 구조에서 50 W급 레이저도 발진 가능할 것으로 예상된다.

Key Wards : Yb:YAG, Micro-Chip, End-Pumped, Diode, Solid-State Laser

1. 서론

준안정 3준위로 발진하는 Yb:YAG 레이저는 양자효율이 높아 Nd:YAG 레이저를 대체할 고출력 레이저로써 주목 받고 있다.[1-5] 특히, Yb:YAG 레이저는 결정에서 발생하는 열이 Nd:YAG의 30% 정도에 지나지 않아 열로 인한 결정의 파손, 복굴절율, 렌즈 효과 등을 줄일 수 있다. 또한 결정의 도핑율을 자유롭게 할 수 있어 Yb가 100% 도핑된 결정도 제조되고 있다. 이는 Nd:YAG의 도핑 한계치(~2%)의 수십배에 해당하는 것으로 레이저 발진에 필요한 광학적 거리(optical length: $N_t \sigma_l$)를 유지하면서 레이저 결정의 길이를 수십배 이상 줄일 수 있게 하였다.

* 한국원자력연구소, 양자광학연구실
(대전시 유성구 덕진동 150 번지
Fax: 042-868-8573
E-mail: chlim@kaeri.re.kr)

본 연구에서는 Yb가 20% 도핑된 0.8 mm 두께의 micro-chip Yb:YAG 레이저를 발진시켰으며 이 레이저의 발진 특성을 조사하였다.

2. 이론

그림 1은 준안정 3준위 레이저로 발진하는 Yb:YAG의 에너지 준위이다. 레이저 상준위와 하준위는 많은 준위가 밀집해 있는 manifold에 위치하며, phonon과의 상호작용에 의해 레이저 유도 방출 시간 보다 빠른 시간에 열적 평형을 이루게 된다. Nd:YAG 등 지금까지의 고체 레이저와는 달리 준안정 3준위 레이저로 발진하는 Yb:YAG는 레이저 하준위에 열적으로 여기된 원자밀도가 존재하며, 이 원자밀도의 양에 의해 레이저 발진 문턱값(laser threshold), 발진 효율 등이 크게 변하게 된다. 상온에서의 Yb:YAG의 발진 문턱값은 2-4 kW/cm^2 정도로 매우 높아, 레이저 발진 초기에는 Ti:sapphire 레

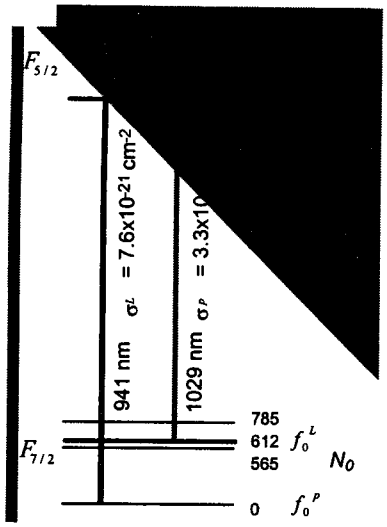

그림 1 Yb:YAG 레이저의 에너지 준위도. 준안정 3준위 레이저로 동작하는 Yb:YAG 레이저는 레이저 하준위에도 열분포에 의해 원자밀도가 존재하게 된다.

이저 등의 레이저를 이용한 여기에 의해서만 발진되었다.[6,7] 최근에 940 nm 파장에서 발진하는 InGaAs계열의 LD(Laser Diode)가 고출력화 되면서 LD의 집광에 의한 고출력 레이저 발진이 보고되고 있다. 이때 입사되는 LD의 세기와 레이저 출력과의 관계는 다음과 같이 주어진다.[8]

$$I_{out} = \eta_{slope}(I_p^+(0) - I_{th}) \tag{1}$$

$$\eta_{slope} = \frac{1-R_2}{(1-\sqrt{R_1R_2})(1+\sqrt{\frac{R_2}{R_1}})}\frac{\nu_L}{\nu_P}(1-e^{\delta_s})(1+R_{pump}e^{\delta_s})$$

$$I_{th} = \frac{\frac{h\nu_L}{\tau_1}[\frac{f_0^L}{f_0^L+f_1^L}N_t l + \frac{1}{\sigma_L(f_0^L+f_1^L)}\ln\frac{1}{\sqrt{R_{out}}}]}{\frac{\nu_L}{\nu_P}(1-e^{\delta_s})(1+R_{pump}e^{\delta_s})}$$

$$\delta_s = -\sigma_P\frac{\Delta}{f_0^L+f_1^L}N_t l + \frac{\sigma_P}{\sigma_L}\frac{f_0^P+f_1^P}{f_0^L+f_1^L}\ln\frac{1}{\sqrt{R_1R_2}}$$

위 식에서 레이저 출력은 입사광의 세기에 비례하는 것을 알 수 있다. 레이저 출력은 준안정 준위의 볼츠만 열분포 확율 f에 의존하며 f는 다시 결정의 온도에 의존하고 있다. 그림 2는 결정의 평균 온도에 따른 레이저 출력을 나타낸 것이다. 결정의 온도가 70 K 이하에서는 레이저 출력이 포화하고 있으나 상온 근처에서는 온도에 비례하여 레이저 출력이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이때 계산에 사용된 수치는 표 1에 정리 하였다.

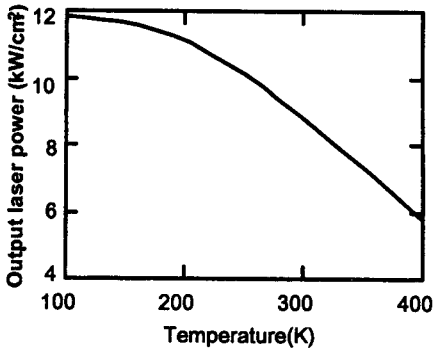

그림 2 Yb:YAG 결정의 평균 온도에 따른 레이저 출력 변화.

3. 실험 및 결과

Yb:YAG는 양자효율(91%)이 높아 여기 레이저의 10% 정도 밖에 열로 전환되지 않지만 문턱값이 높기 때문에 레이저 결정내의 작은 부분에 집중되어 발열하게 되며 이의 효율적인 냉각이 요구되고 있다. 10 W/mm^2 로 종여기하는 경우 두께 0.4 mm의 micro-chip laser의 앞면과 뒷면의 온도차이는 250 C가 넘게 되며, 결정의 온도차이로 인하여 결정의 변형 및 레이저 빔의 품질 저하가 예상된다. 여기레이저가 입사되는 면에서의 발열량이 결정내에서도 가장 높지만, 지금까지는 입사면에서의 효율적인 냉각이 이루워지지 못했었다.

입사면에서 발생하는 열을 효율적으로 제거하기 위하여 그림 3과 같이 레이저를 구성하였다. Yb:YAG 결정의 표면에서 발생하는 열은 열전도가 좋은 sapphire 창을 이용하여 구리판으로 전달되도록 하였다. 사용된 결정은 Yb가 8% 도핑된 YAG결정으로 결정의 1030 nm 파장에서 뒷면은 반사율 99%로 앞면은 97%로 유전체 박막코팅을 하였다. 여기레이저는 SDL사의 single mode InGaAs를 사용했으며 중심 파장은 940 nm, 최대출력은 1.2 W이다.

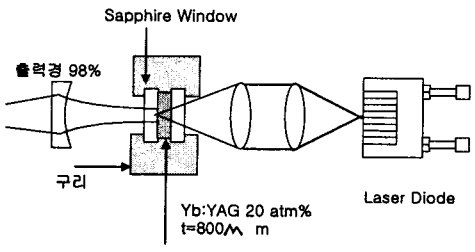

그림 3 Micro-chip Yb:YAG 레이저의 구성도.

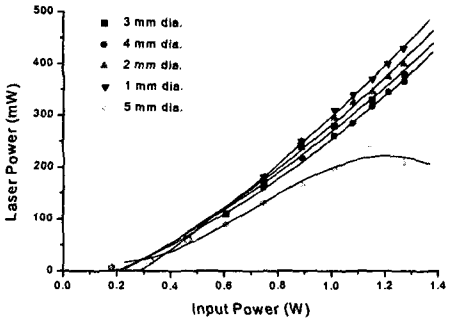

그림 4(a) 구리 냉각판의 지름에 따른 레이저의 출력 변화. 구리 냉각판의 지름이 5 mm일 경우 냉각판에 의한 냉각 속도 보다 LD에 의한 가열 속도가 빠르기 때문에 출력이 감소하고 있다.

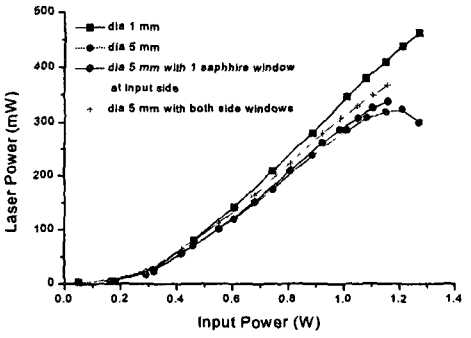

그림 4(b) 구리 냉각판의 지름이 5 mm일 경우 sapphire 창을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우의 레이저 출력 비교. 이때 각각의 출력을 구리 냉각판의 지름이 1 mm인 출력과 비교하였다.

Table 1. Pertinent material parameters for Yb:YAG

Laser wavelength	1030 nm
Excited state lifetime at room temperature	951 mm
Peak emission cross section	2.1×10^{-20} cm^2
Absorption wave length	942 nm
Pump beam cross section	7.7×10^{-21} cm^2
Doping density for 1 atm%	1.38×10^{20} cm^3

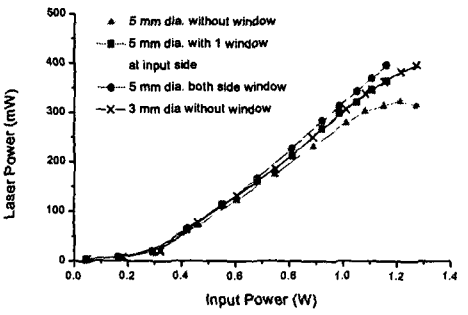

그림 4(c) 구리 냉각판의 지름이 3 mm인 영우와 지름이 5 mm이며 단면에 sapphire창을 설치한 경우의 출력 특성이 거의 일치함을 알 수 있다.

LD 출력은 4장의 cylindrical lens를 사용하여 결정에 집광하였으며 이때 여기광의 단위면적당 출력은 30 kW/mm^2 이었다. 본 실험에서는 결정의 측면에서만 냉각하는 경우와 결정의 표면을 냉각하는 경우를 비교하기 위하여, sapphire 창이 없는 경우, 단면만 설치한 경우, 양면에 설치한 경우 각각의 레이저 발진 특성을 비교하여 보았다. 그림 4는 LD 출력에 따른 레이저의 출력 특성이다. 그림 4(a)는 냉각용 sapphire 창이 없는 경우 구리 냉각판의 구멍 크기를 변화하며 레이저 출력을 측정한 것이다. 결정에서 구리 냉각판이 가까울수록 냉각 효과가 크기 때문에 레이저 출력은 구멍의 직경이 작아짐에 따라 증가함을 볼 수 있었다. 그러나 구리판의 직경이 5 mm의 경우 입사 에너지가 증가함에 따라 오히려 레이저 출력이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 여기광에 의한 결정 내부의 온도 증가 속도가 냉가판에 의한 냉각 속도 보다 빠르기 때문에 기인한다. 냉각용 sapphire 창이 없는 경우 구리판의 구멍 직경이 1 mm인 경우 레이저 전환 효율이 45%, slope efficiency 64%를 얻을 수 있었다. 그림 4(b)는 구리판의 직경이 5 mm인 경우 sapphire 창을 설치하면서 측정한 레이저 출력을 나타낸 것이다. 냉각용 sapphire 창을 넣었을 때와 창이 없는 경우와 비교하면 문턱값은 같지만 slope efficiency가 43%에서 56%로 증가함을 볼 수 있다. 각각의 경우를 구리판 구멍의 직경이 1 mm인 경우와 비교하였다. 그림 4(c)는 구리판의 직경이 5 mm인 경우 sapphire 창을 설치하면서 측정한 레이저 출력을 sapphire 창이 없고 구리 구리 냉각판이 3 mm이 경우의 레이저 출력과 비교한 것이다. 구리 냉각판의 직경이 5 mm이

며 입사면 쪽에만 sapphire 창을 설치한 출력값과 sapphire 창이 없이 구리 냉각판의 지름을 3 mm로 한 경우의 출력이 일치 함을 볼 수 있다. 이 결과로부터10 W/mm^2 이상의 열이 sapphire 창으로 전달되고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

여기면을 sapphire 창으로 냉각하는 micro-chip Yb:YAG 레이저의 발진 특성을 조사하였다. 레이저 전환 효율은 38%였으며 레이저 발진 문턱값은 4 kW/mm^2, slope efficiency는 56%로 측정되었다. Sapphire 창을 사용하는 경우 표면에서의 열전달도는 10 W/mm^2 이상으로 관측되었으며, micro-chip Yb:YAG의 도핑율 출력경의 반사율 등을 최적화할 경우 같은 구조에서 50 W급 레이저도 발진 가능할 것으로 예상된다.

참고 문헌

[1] W. F. Krupke and L.L. Chase, Ground-state depleted solid-state lasers: principles, characteristics and scaling , Opt. Quantum Electron. **22**, S1-S22 (1989).

[2] S. Payne, L. L. Chase, L. Smith, W. Kway, and W. F. Krupke, Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er3+, Tm3+, and Ho3+, IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, pp. 2612-2630, 1992.

[3] A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower, Scalable concept for diode-pumped high power solid-state lasers, Appl. Phys. B58, 365-372 (1994)

[4] T. S. Rutherford, W. M. Tulloch, E. K. Gustafson, and R. L. Byer, Demonstration and scaling of edge-pumped zig-zag slab lasers, Advanced Solid State Lasers Conference 2000, MA2-1

[5] T. Y. Fan and R. L. Byer, Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser, IEEE J. Quantum Electron., vol. 23, pp. 605-612, 1987.

[6] T. Y. Fan, Heat generation in Nd:YAG and Yb;YAG, IEEE J. Quantum Electron., vol. 29, pp. 1457-1459, 1993.

[7] P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan, "Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser," Opt. Lett., vol. 16, pp. 1089-1091, 1991.

[8] R. J. Beach, CW theory of quasi-three level end-pumped laser oscillators, Opt. Commun., vol. 123, pp. 385-393, 1995.