

종편 펌핑 Thin-Disk Yb:YAG 레이저의 출력 특성

Output Characteristics of an End-Pumped Thin-Disk Yb:YAG Laser

임창환, 이성만, 차병헌, 김철중
 한국원자력연구소 양자광학팀
 chlim@kaeri.re.kr

준안정 3준위로 발진하는 Yb:YAG 레이저는 양자효율이 높아 Nd:YAG 레이저를 대체할 고출력 레이저로써 주목 받고 있다. 특히, Yb:YAG 레이저는 결정에서 발생하는 열이 Nd:YAG의 30% 정도에 지나지 않아 열로 인한 결정의 파손, 복굴절을, 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: $N_L \sigma$)를 유지하면서 레이저 결정의 길이를 수십배 이상 줄일 수 있게 하였다. 본 연구에서는 Yb가 20% 도핑된 0.8 mm 두께의 micro-chip Yb:YAG 레이저를 발진시켰으며 이 레이저의 발진 특성을 조사하였다.

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/cm² 정도로 매우 높아, 레이저 발진 초기에는 Ti:sapphire 레이저 등의 레이저를 이용한 여기에 의해서만 발진 되었다. 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.

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

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

$$I_{th} = \frac{\frac{h\nu_L}{\tau_1} \left[\frac{f_0^L}{f_0^L + f_1^L} N_L I + \frac{1}{\sigma_L (f_0^L + f_1^L)} \ln \frac{1}{\sqrt{R_{out}}} \right]}{\frac{\nu_L (1 - e^{-\delta_e})(1 + R_{pump} e^{\delta_e})}{\nu_p}}$$

$$\delta_e = -\sigma_p \frac{\Delta}{f_0^L + f_1^L} N_L I + \frac{\sigma_p (f_0^p + f_1^p)}{\sigma_L (f_0^L + f_1^L)} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}$$

위 식에서 레이저 출력은 입사광의 세기에 비례하는 것을 알 수 있다. 레이저 출력은 준안정 준위의 볼츠만 열분포 확률 f 에 의존하며 f 는 다시 결정의 온도에 의존하고 있다.

본 실험에서는 결정의 측면에서만 생각하는 경우와 결정의 표면을 생각하는 경우를 비교하기 위하여, sapphire 창이 없는 경우, 단면만 설치한 경우, 양면에 설치한 경우 각각의 레이저 발진 특성을 비교하여 보았다. 그림 2는 LD 출력에 따른 레이저의 출력 특성이다. 그림 2(a)는 냉각용 sapphire 창이 없는 경우 구리 냉각판의 구멍 크기를 변화하며 레이저 출력을 측정하는 것이다. 결정에서 구리 냉각판이 가까

울수록 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 냉각판에 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 2(b)는 구리판의 직경이 5 mm인 경우 sapphire 창을 설치하면서 측정된 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 2(c)는 구리판의 직경이 5 mm인 경우 sapphire 창을 설치하면서 측정된 레이저 출력을 sapphire 창이 없고 구리 구리 냉각판이 3 mm인 경우의 레이저 출력과 비교한 것이다. 구리 냉각판의 직경이 5 mm이며 입사면 쪽에만 sapphire 창을 설치한 출력값과 sapphire 창이 없이 구리 냉각판의 지름을 3 mm로 한 경우의 출력이 일치함을 볼 수 있다. 이 결과로부터 10 W/mm² 이상의 열이 sapphire 창으로 전달되고 있음을 알 수 있다.

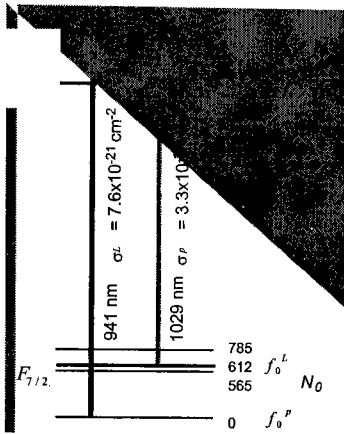


그림 1 Yb:YAG 레이저의 에너지 준위도.

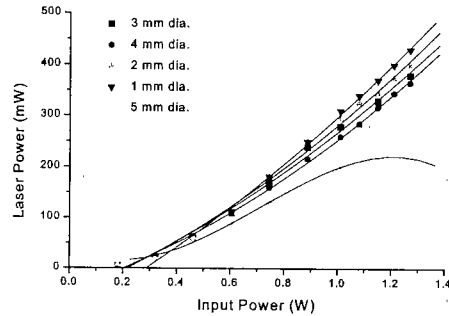


그림 2(a) 구리 냉각판의 지름에 따른 레이저의 출력 변화. 구리 냉각판의 지름이 5 mm일 경우 냉각판에 의한 냉각 속도 보다 LD에 의한 가열 속도가 빠르기 때문에 출력이 감소하고 있다.

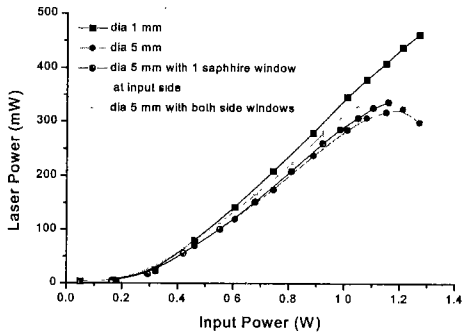


그림 2(b) 구리 냉각판의 지름이 5 mm일 경우 sapphire 창을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우의 레이저 출력 비교. 이때 각각의 출력을 구리 냉각판의 지름이 1 mm인 출력과 비교하였다.

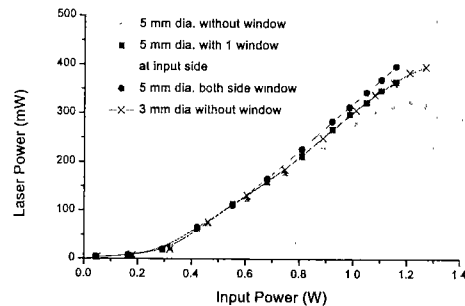


그림 2(c). 구리 냉각판의 지름이 3 mm인 경우와 지름이 5 mm이며 단면에 sapphire창을 설치한 경우의 출력 특성이 거의 일치함을 알 수 있다.