

다이오드 여기 750 W급 열 복굴절 보상된 고출력 Nd:YAG

레이저 제작 및 공진기 안정조건 분석

Construction of a diode-pumped, thermal birefringence compensated Nd:YAG laser with the output power of 750

W and analysis of resonator stability conditions

이성만, 김선국, 윤미정, 김현수, 임창환, 차병헌, 김철중, 문희중*, 석성수**, 오철한**
 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀, *세종대학교 광공학과, **경북대학교 물리학과
 smlee3@kaeri.re.kr

지금까지 다이오드 여기 고체레이저는 여기원인 레이저 다이오드의 고가로 인하여 비교적 100 W 미만의 저출력이 요구되는 레이저 마킹, 미세가공, 정밀용접, 보석가공 등의 가공산업분야와 Ti:sapphire 등의 고체레이저 결정 여기, 레이저 분광, 그리고 비선형 현상 측정 등의 연구분야, 그리고 의료용 레이저 산업분야 등에서 주로 이용되어 왔다. 그러나, 최근 다이오드 여기 고출력 고체레이저는 레이저 빔질 인자(M^2)가 1.1인 200 W의 출력을 갖는 고광도의 Nd:YAG 레이저가 개발되었고, 단기당 2 kW를 상회하는 고출력 레이저 모듈의 개발 성공 등 레이저빔의 질과 출력 면에서 급격한 향상을 이룩하고 있다. 따라서, 고출력 다이오드 여기 고체레이저는 자동차 산업 분야의 절단 및 용접 분야와 반도체 산업분야 등에서 수요가 크게 증대할 것으로 예측되고 있다. 본 발표에서는 레이저빔의 개선과 출력 증대를 목적으로 최근 제작된 750 W급의 고출력 Nd:YAG 레이저의 출력특성과 다양한 응용에 따른 공진기의 설계 조건에 대한 분석결과를 보고한다.

본 연구에서 사용된 두 개의 레이저 헤드와 공진기의 구조는 그림 1과 같다. 각각의 레이저 헤드는 Nd:YAG 결정, 난반사 공동체, 그리고 3개의 다이오드 어레이들로 구성되어 있다. 다이오드 어레이는 40 W 출력을 갖는 레이저 다이오드 소자가 열교환기에 9개가 직렬로 연결된 다이오드 바(IMC, Industrial Microphotonics Company) 형태로서, 808 nm 파장에서 최대 360 W의 출력을 낸다. 이러한 다이오드 어레이는 지름이 16 mm인 난반사 광공동의 둘레로 120° 간격으로 나 있는 1.3 mm의 세 개의 좁은 슬릿을 통해 레이저 헤드당 총 1,080 W의 출력으로 레이저 결정을 여기한다. 레이저 매질은 지름 5 mm, 길이 120 mm의 봉 형태이고, Nd³⁺가 0.6 at. % 도핑된 Nd:YAG 결정(Union Carbide사)이 사용되었다. 레이저 발진을 위해 평면-평행 공진기가 구성되었으며, 두 개의 레이저 헤드 사이에는 열 복굴절 보상을 위해서 90° 석영 회전자가 사용되었다.

상기 레이저 공진기에 대한 레이저 다이오드의 여기 출력, 레이저 거울과 레이저 결정 사이의 거리(d), 그리고 레이저 결정 사이의 거리(d_m)에 따른 공진기 안정조건에 대해 1회 왕복행렬을 이용한 분석 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 본 레이저 시스템에서 최소의 레이저 결정 사이의 간극인 188 mm인 경우이며, 2(b)는 최대 여기 출력에서 레이저 결정의 열초점 거리의 두배인 218 mm인 경우이다. 열렌즈를 포함하는 공진기는 여기 출력이 증가함에 따라 공진기의 동작조건이 변화하게 된다. 그림 2와

같이 초기조건에서 여기 출력이 증가함에 따라 공진기는 $g_1=0$ 와 $g_2=0$ 사이의 좁은 영역 B를 제외하고 $g_1 \cdot g_2(g_1 < 0, g_2 < 0) = 1$ 에 해당하는 선-c인 지점까지 영역 A와 C의 안정조건에서 동작한다. 계속해서 여기 출력이 증가하면 공진기는 $g_1 \cdot g_2(g_1 < 0, g_2 < 0) > 1$ 인 지점에 해당하는 영역 D의 불안정 영역에 도달하여 레이저 발진이 불가능해진다. 여기 출력이 계속해서 증가하면 $g_1 \cdot g_2(g_1 < 0, g_2 < 0) < 1$ 인 영역과 $g_1 \cdot g_2(g_1 > 0, g_2 > 0) < 1$ 인 영역에 순차적으로 도달하게 되며 영역 E와 G의 안정조건에서 동작을 지속하게 된다. 영역 F는 $g_1=0$ 와 $g_2=0$ 사이의 불안정 영역이다. 마지막으로 공진기는 $g_1 \cdot g_2(g_1, g_2 > 0) = 1$ 에 해당하는 선-g를 넘어선 영역 H로 이동하게 되고 $g_1 \cdot g_2(g_1, g_2 > 0) > 1$ 에 해당하기 때문에 레이저 동작이 불가능하게 된다. 거리 d의 의존성을 보면 짧은 거리에서는 영역 A의 안정조건에 해당하는 여기출력의 범위가 넓으나, 긴 거리에서는 영역 A의 범위가 크게 축소됨을 알 수 있다. 따라서 제 2 조화파 발생장치 등의 광학계 설치를 위한 긴 거리의 d가 필요할 시에는 그림 2(b)에 보여진 것처럼 d_m 의 거리를 증가시켜 영역 A, C와 영역 E, G를 연속적으로 사용하는 공진기의 구성이 필요함을 알 수 있다.

그림 3은 출력경의 반사율 65%, $d_m=188$ mm, 거리 $d=95.6-225.6$ mm에서 레이저 다이오드의 출력에 따른 레이저 출력의 변화를 나타낸 실험결과이다. 최대 여기 출력 1,922 W에서 776 W의 레이저 출력을 얻었으며, 이 결과는 기울기효율 61.2%, 광전환효율 40.4%에 해당한다. 레이저의 안정조건에서 분석된 결과와 같이 거리 d가 증가함에 따라 안정적인 레이저 발진이 가능한 최대 허용 여기출력의 범위가 크게 감소하며, 따라서 레이저 출력도 크게 감소함을 보여준다.

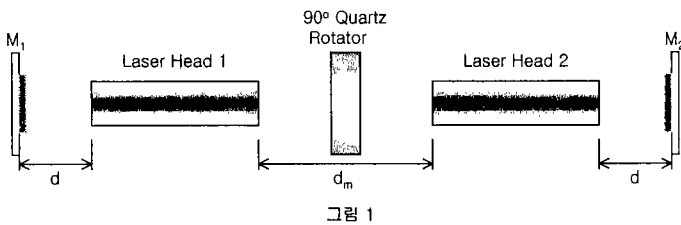


그림 1

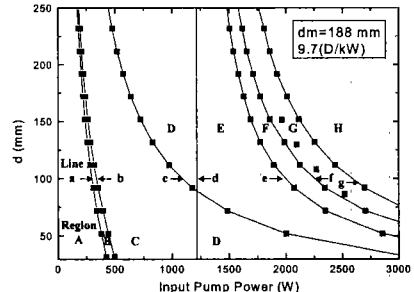


그림 2(a)

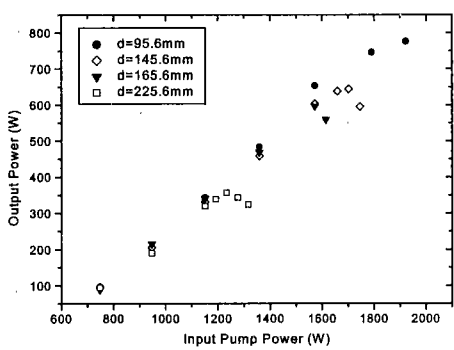


그림 3

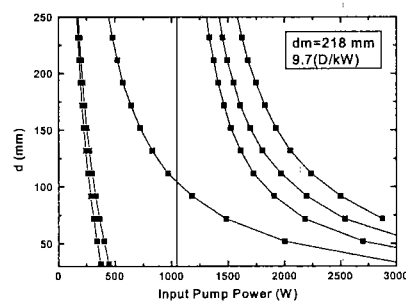


그림 2(b)