

A Linearly Polarized Long-Cavity Yb:YAG Laser with a Variable-Reflectivity Output Coupler

Hyun Chul Kim, Han Bum Lim, and Hyun Su Kim[†]

Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

(Received October 21, 2014; Revised manuscript January 7, 2015; Accepted January 7, 2015)

We propose a linearly polarized long-cavity Yb:YAG laser with a variable-reflectivity output coupler and investigate its output characteristics. The variable output coupler consists of a polarized beam splitter and a quarter-wave plate. The linearly polarized laser has a long cavity length of about 3.7 m. The slope efficiency of the proposed laser is 19%, and the beam quality (M^2) is about 1.2.

Keywords: Yb:YAG laser, Diode pumped laser

OCIS codes: (140.3615) Lasers, ytterbium; (140.3480) Lasers, diode-pumped

반사도 가변형 출력경을 갖는 긴 공진기형 선편광 Yb:YAG 레이저의 출력 특성 연구

김현철 · 임한범 · 김현수[†]

조선대학교 광기술공학과

☎ 501-759 광주광역시 동구 필문대로 309번지

(2014년 10월 21일 받음, 2015년 1월 7일 수정본 받음, 2015년 1월 7일 게재 확정)

반사도 가변형 출력경을 갖는 긴 공진기형 선편광 Yb:YAG 레이저를 제안하고 그 출력 특성을 조사하였다. 반사도 가변형 출력경은 편광 광 분할기와 1/4 파장판로 구성되어 있다. 제안된 레이저 공진기 길이는 약 3.7 m 이다. 제안된 레이저의 기울기 효율은 19%이고 빔질 (M^2)은 약 1.2이었다.

Keywords: Yb:YAG 레이저, 다이오드 여기 레이저

OCIS codes: (140.3615) Lasers, ytterbium; (140.3480) Lasers, diode-pumped

I. 서 론

Yb:YAG는 가시광선영역에 펌프대역이 없고 942 nm 근방에서 단일 흡수선을 가지고 있기 때문에 가시광 영역 대에서 빛을 방출하는 플랫폼 램프에 의한 레이저 발진이 어렵다^[1]. 그러나 940 nm 파장 대로 발진하는 InGaAs 다이오드 레이저(LD)가 개발된 후 레이저 연구자들이 Yb:YAG에 많은 관심을 가지게 되었다^[1, 2]. 특히 LD로 중 펌핑하는 디스크형 Yb:YAG는 산업용 고출력 레이저로 많은 관심을 가지고 개발되고 있다^[2, 3]. 적외선 영역에서 발진하는 Yb:YAG 레이저는 자외선 영역에서 발진하는 엑시머 레이저보다 가공의 정밀성은 떨어지지만 Yb:YAG 레이저는 1 kW이상의 고출력 발진이 가능하고 엑시머 레이저와 같은 위독 가스를 사용하지 않기 때문에 안전한 작업환경에서 매질을 가공할 수 있는

장점을 가지고 있다^[4]. 그리고 비선형 결정체를 이용한 파장 변환장치를 이용하면 Yb:YAG 레이저로부터 엑시머 레이저와 같은 단파장 영역의 레이저 광을 얻을 수 있어서 정밀 가공이 또한 가능하다^[5]. 단파장을 얻기 위해 비선형 결정을 사용하려면 일반적으로 비선형 결정에 입사하는 레이저 광을 선형편광 되도록 해야 한다^[1]. 짧은 파장에 의한 정밀가공 외에도 극초단 펄스에 의해서도 정밀가공이 가능하다^[6]. 따라서 레이저 출력이 짧은 파장 조건과 극초단 펄스 조건을 만족하면 보다 더 정밀한 가공이 가능하다. 정밀 가공을 위한 극초단 펄스 발생은 주로 모드잠금(mode-locking) 기술에 의해 이루어지며 특히 피코초 이하의 극초단 펄스는 수동형 모드 잠금 기술에 의해 이루어진다^[7]. 안정적인 수동형 모드 잠금 펄스를 발생하기 위해서는 Yb:YAG 레이저와 같은 고체 레이저에서는 일반적으로 공진기 길이를 길게 유지해야 한

[†]E-mail: hskim21@chosun.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

다^[8]. 따라서 본 연구에서는 모드 잠금을 할 수 있는 긴 공진기 구조이면서 고조파 발생을 할 수 있는 구조의 선형 편광된 Yb:YAG 레이저 공진기에 대한 연구를 하였다.

본 논문에서 연구한 선편광된 Yb:YAG 레이저 공진기는 편광 광 분할기(PBS)과 1/4 파장판(QWP)을 공진기 내부에 삽입해서 출력을 가변 할 수 있는 구조로 되어 있다^[9]. 이 구조는 QWP를 회전시켜 공진기의 투과율을 손쉽게 조절할 수 있어 Yb:YAG 레이저 출력을 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 레이저 공진기를 모드 잠금용 공진기로 활용하기 위해서는 공진기 길이를 수 m의 길이로 증가시켜야 하기 때문에 레이저 안정영역에서 동작하기 위해서는 추가적인 광전송용 광학소자들을 필요로 한다. 또한 공진기내의 이러한 추가적인 광학소자들의 미세한 위치 변화는 공진기의 공진 모드 크기와 레이저 안정도에 영향을 주어 레이저 출력 변화에 많은 영향을 주기 때문에 공진기의 정렬이 매우 어렵다. 레이저 발진을 위한 최적 조건을 찾기 위해 공진기 내부에 설치된 광학소자들의 위치를 미세 조절하면 연달아 다른 광학소자도 필수적으로 조절해야 한다. 이런 문제로 공진기 내부에 설치된 모든 광학소자에 미세 위치 조정하면서 공진기의 최적조건을 찾기는 어렵다. 반면에 레이저 공진기의 경계에 위치한 레이저 반사경의 경우는 최적 조건을 찾기 위한 미세변화를 주어도 다른 광학소자의 재정렬이 필요하지 않아 공진기 정렬이 상대적으로 간편하다. 따라서 본 연구에서는 연속발진 조건에서 선편광된 긴 레이저 공진기의 출력과 QWP의 광축 회전각 및 레이저 반사경의 미세변화에 따른 공진 모드 크기와와 상관관계를 분석하고 이를 통해 긴 공진기형 선편광된 레이저의 출력을 최적화하는 연구를 수행하였다.

II. 선편광된 긴 공진기 구조의 Yb:YAG 레이저

PBS와 QWP로 구성된 출력경을 이용한 선편광된 긴 공진기형 Yb:YAG 레이저 구조는 Fig. 1과 같다. 모드 잠금용 공진기로 활용할 수 있는 긴 공진기 구조를 만들기 위해 공진기 내부에 구면경과 렌즈를 추가로 삽입하였다. 긴 공진기 구조를 만들기 위해 공진기 내부에 삽입된 구면경(M₂)의 곡률 반경(R)은 300 mm이다. 렌즈 L₃의 초점거리(f)는 50 mm이다. 구면경(M₂)는 공진기 내에서 시준기와 같은 역할을 하고 있다. 렌즈(L₃)는 레이저 공진모드 빔이 레이저 거울(M₄)에 집광되게 하는 역할을 한다. SESAM을 이용한 모드 잠금인 경우 레이저 거울(M₄)을 SESAM으로 대체하여 모드 잠금이 이루어지도록 한다.

Figure 1의 Yb:YAG의 Yb 도핑율은 5 at%이고 크기는 직경 5 mm, 두께 3.5 mm이다. 반사경(M₁)은 파장 940 nm에서 투과(>90%)하고 파장 1030 nm에서는 고반사(>99%) 하도록 설계된 평면경이다. 펌프용 LD는 중심파장 940 nm에서 발진하고 최대 출력이 30 W이다. LD에 결합된 광섬유의 코아 크기는 400 μm이며 측정된 LD의 빔질(M²)은 약 121이다. 펌프광의 집광용 렌즈는 두 개의 평-볼록 렌즈(L₁, L₂)를 이

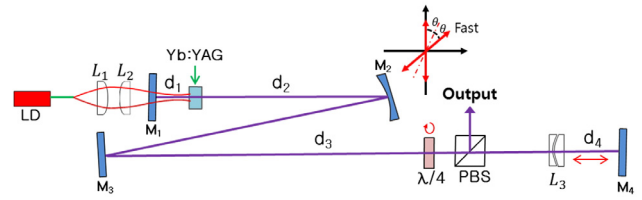


FIG. 1. Scheme of a linearly polarized long-cavity Yb:YAG laser with the output coupler composed of a polarized beam splitter and a quarter wave plate.

용하였고 각 렌즈의 초점거리는 35 mm, 25.4 mm이다. 렌즈(L₂)의 마운트와 집광위치(Yb:YAG 위치) 사이의 거리가 짧아 집광위치에서 CCD를 이용해 집적적인 펄스광의 크기 측정이 어려워서 LD의 빔질(M²) 값과 펄스광을 집광하기 위한 광학 요소들에 대한 파라미터를 이용해 집광 위치에서의 펄스광의 크기를 계산하였다^[10]. 이 값들로부터 얻은 펄스광의 반경은 약 328 mm이다. QWP와 PBS를 이용한 출력경은 출력경의 투과율을 연속적으로 변화시킬 수 있고 출력 광을 선편광 되도록 한다. QWP의 빠른 축과 PBS의 수직 편광축이 이루는 각(θ)에 따라 투과율이 결정된다. 투과율은 sin²(2θ)로 주어진다.

중펌핑 구조의 레이저 출력은 레이저 매질 상에서 레이저 공진모드의 크기와 레이저 안정조건과 밀접한 관계가 있다^[11]. 본 연구에서는 레이저 공진 모드 크기를 구하기 위해서 ABCD 광선 전달 행렬을 이용하였다. 레이저 공진기에 대한 ABCD 행렬은 식 (1)과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_g & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2d_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_g & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 f_g는 레이저 매질의 열 렌즈효과에 의한 초점 거리이다. 식 (1)에서는 레이저 매질의 두께, QWP와 렌즈 L₃의 두께는 무시하였다. PBS 두께는 굴절률을 고려해서 두께 d₃에 포함시켰다. 식 (1)과 같이 주어진 공진기에 대한 공진기 안정조건은 다음과 같이 주어진다.

$$-1 \leq \frac{A+D}{2} \leq 1 \quad (2)$$

Figure 1과 같은 긴 레이저 공진기의 출력은 상대적으로 길이가 짧은 d₁, d₂, d₄에 영향을 주는 거울들(M₁, M₂, M₄)의 미세한 위치 변화에 민감하게 변한다. Figure 3은 식(2)을 이용해 거리(d₁, d₂, d₄)에 변화에 대한 공진기 안정도(S=(A+D)/2)을 구한 것이다. 중 펌핑된 Yb:YAG의 열 초점 거리(f_g)는 간단한 실험적 방법으로 정확히 구하기 어렵다. 본 연구에서는 f_g를 구하기 위해 짧은 길이의 공진기를 구성하고 불안정 공진 조건이 되는 펄스 광 세기를 조사하였다^[10]. 이 방법을 통해서 26 W 펄스광 세기는 약 150 mm의 Yb:YAG의 열 초점 거리(f_g)에 해당하는 것을 알 수 있었다. 따라서

펌핑광 세기가 26W 이하의 경우는 f_g 가 150 mm 보다 크다는 것을 의미한다. 따라서 열 초점 거리 150 mm 이상 중의 하나인 200 mm의 열 초점 거리에 대한 공진기 안정도를 조사하였다.

Figure 2에서 d_1 의 미세 길이 변화에 의해 d_2 , d_4 의 공진기 안정영역의 위치가 많이 변함을 알 수 있다. d_1 의 길이를 조절을 가능하게 하는 M_1 의 위치는 펌프광을 집속하는 광학계와 레이저 매질 마운트와 가깝게 붙어 있어서 d_1 의 길이를 조절하기 어렵다. 그리고 Fig. 2는 d_2 의 안정영역 범위가 수 mm 이내의 협소한 영역에서 형성되고 있음을 보여준다. d_2 의 길이를 변화시킬 수 있는 M_2 의 위치는 공진기 내부에 있어서 위치조절을 하기 위해서 공진기 재정렬이 필요로 하기 때문

에 위치조절이 어렵다. d_4 의 길이도 공진기 안정도에 민감하게 영향을 주지만 M_4 의 위치가 공진기의 경계에 있기 때문에 상대적으로 위치 조절이 쉽다. 따라서 본 연구에서는 d_4 의 미세 거리 변화에 대한 레이저 모드 크기를 변화를 분석하고 레이저 출력 특성을 조사하였다.

Figure 2의 결과를 바탕으로 공진기 길이 d_1 은 약 12 mm로 설정하고 d_2 는 구면경(M_2)의 초점거리(150 mm)보다 적은 143 mm로 설정하였다. 이 설정 값들에 대해 안정도를 조사하면 모드 빔이 M_2 과 L_2 사이의 거리(d_3)가 수 m 거리가 되어도 공진할 수 있다. 본 실험에서는 거리(d_3)을 3.5 m로 설정하여 긴 공진기가 되도록 했다. Figure 3은 식 (3)을 이용해 d_4 의 미세 변화에 대한 레이저 매질에서의 모드 크기(ω_L)를 보여준다. 레이저 매질에서 가우시안 모드의 반경(ω_L)은 식 (3)과 같은 관계식을 이용해 구했다¹⁰⁾.

$$\omega_L^2 = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{|B|}{\sqrt{4-(A+D)^2}} \quad (3)$$

d_4 의 수 mm 크기의 미세 변화에 대해 ω_L 가 크게 변화함을 알 수 있다. Figure 3은 열 초점거리(f_g)가 짧아질수록 d_4 의 안정영역 구간이 넓어짐을 보여준다. 열초점 거리 변화에 대한 안정도 계산 결과는 초점거리(f_g)가 짧아질수록 Fig. 2의 안정도 영역이 d_2 길이가 감소하는 쪽으로 이동함을 보여주었다. 안정영역에서 레이저가 동작할 수 있는 d_4 의 거리 변화 폭은 레이저 매질의 열 렌즈 효과에 따라 차이가 있지만 약 4~5 mm임을 알 수 있고 d_4 의 길이는 렌즈 L_3 의 초점거리(50 mm)보다 작다는 것을 알 수 있다. ω_L 가 레이저 매질에서 펌핑광(ω_p)의 크기 보다 상대적으로 크면 저차 공진 모드 빔이 얻을 수 있지만 이득이 작게 되어 레이저 발진이 어려워진다.

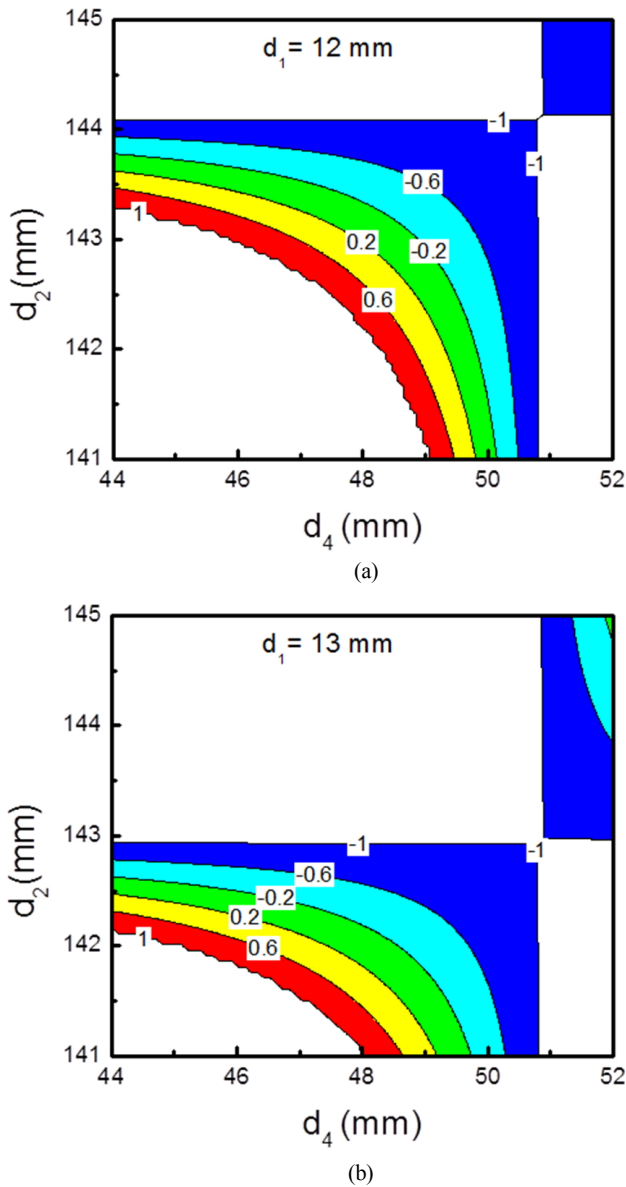


FIG. 2. Stability of the proposed laser as a function of d_2 and d_4 at (a) $d_1=12$ mm and (b) $d_1=13$ mm.

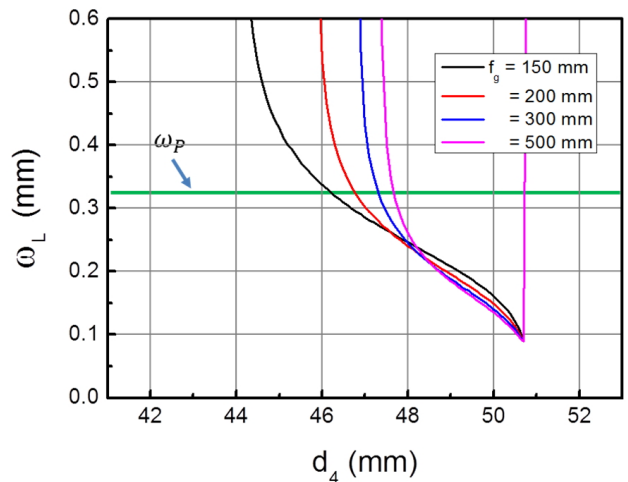


FIG. 3. Calculated mode beam radius at Yb:YAG position as a function of d_4 when $d_4=12$ mm and $d_2=143$.

III. 실험 결과 및 토의

Figure 1의 QWP의 회전 각(θ)을 변화시켜 PBS의 반사량을 조절할 수 있기 때문에 θ 를 변화시켜 Yb:YAG 레이저 출력을 조절 할 수 있다. QWP 회전 각(θ)에 따른 레이저 출력은 Fig. 4와 같다. 펌프광 세기(P_{pump})를 변화시키면서 θ 변화에 대한 출력 특성을 조사하였다.

레이저 출력은 QWP의 회전 각(θ)이 약 7도일 때 최대가 되었다. 7도에 대한 투과율은 약 5.8%이다. Figure 4의 결과를 구하기 위해 d_1 는 약 12 mm, d_2 는 약 143 mm, d_4 는 약 48 mm로 하였다. d_1 , d_2 , d_4 의 거리는 렌즈 두께, 광학 소자 마운트 등을 고려해서 측정해도 ± 0.5 mm이하 오차 범위로 정확히 측정하기 어려웠다. 이 거리는 여러 번의 시행착오를 통해 얻은 레이저 출력이 가장 잘 나오는 d_1 , d_2 , d_4 의 거리이다. 48 mm의 d_4 거리를 기준으로 상대적인 레이저 출력의 변화를 조사하기 위해 거울 M_4 의 마운트에 마이크로 나사를 설치하여 d_4 의 상대적인 미세 변화량(Δd_4)를 정밀하게 측정하였다.

Figure 5는 QWP의 회전 각(θ)이 약 7도일 때 미세 변화량(Δd_4)에 대한 레이저 출력을 측정한 것이다.

$\Delta d_4=0$ 인 지점을 중심으로 레이저 출력이 감소하는 경향을 보였다. $\Delta d_4<0$ 인 영역에서는 Fig. 3에서 $d_4=48\pm 0.5$ mm의 기준에서 보면 ω_L/ω_P 의 비가 1보다 큰 영역에 있고 불안정 영역에 가까운 지점에 있기 때문에 발진 효율이 떨어져 출력이 감소한 것으로 보인다. 반면에 $\Delta d_4>0$ 인 영역에서는 Fig. 4를 보면 ω_L/ω_P 의 비가 1보다 작게 감소하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 ω_L/ω_P 의 비가 작을수록 공진기에서 고차모드가 발진할 확률이 높고 고차모드가 발생하면 레이저 빔 질이 떨어지고 레이저 출력이 증가하는 경향이 있다. 그러나 본 연구에서는 레이저 출력이 이 영역에서 레이저 출력이 감소하는 경향을 보였다. $\Delta d_4>0$ 인 영역에서 고차모드의 발진 여부를 확인을 위해 빔질(M^2)을 측정하였다. Figure 6은 Fig.

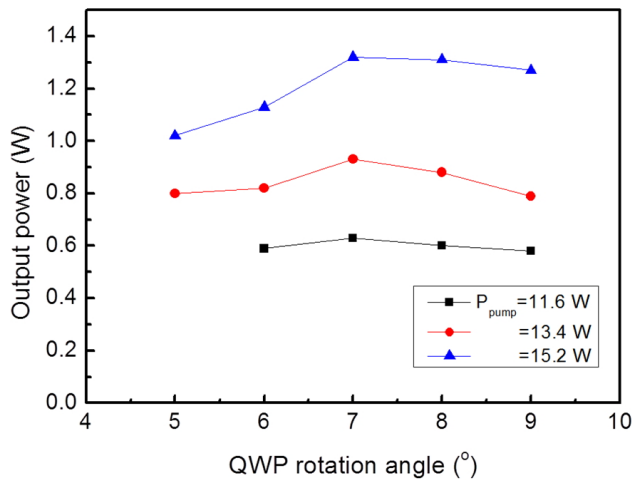


FIG. 4. Output power of the laser as a function of a rotation angle (θ) of a quarter wave plate.

5와 같은 조건에서 레이저의 빔질(M^2)를 측정한 것이다.

빔질(M^2)은 1.1에서 1.4 이하 값을 가졌다. 특별히 $\Delta d_4>0$ 영역에서 M^2 값의 급격한 변화는 없음을 알 수 있다. 즉, 예상과는 다르게 $\Delta d_4>0$ 영역에서 작은 양의 고차모드들이 발생했음을 의미한다. 일반적으로 중 펌핑 구조에서는 집속된 펌프 광의 직경 크기에 의해 큰 직경을 갖는 고차모드들이 작은 크기의 것들 보다 이득을 얻지 못해서 소멸하는 경향이 있다. Figure 3을 보면 $d_4=49$ mm에서 가우시안 모드 빔 크기 ω_L 는 185 μm 이고 이 값은 펌프광 크기 328 μm 의 1/2보다 약간 크다. 반면에 최적 지점인 $d_4=48$ mm에서 ω_L 는 245 μm 이다. 고차모드들이 들어있는 레이저 빔의 크기는 $\sqrt{M^2} \omega_L$ 로 구할 수 있다. $d_4=48$ mm에서 $M^2=1.1\sim 1.2$ 을 이용하면 레이저 빔 크기는 258~270 μm 정도이다. 반면에 $d_4=49$ mm에서 $M^2=1.3\sim 1.4$ 을 이용하면 레이저 빔 크기는 211~219 μm 이다. 펌프 광 크기 328 μm 에 비해 두 값들은 작지만 $d_4=49$ mm에서 보다 더 작다. 집속된 펌프 광의 직경 크기에 의해 고차모드의 발진 억제만 있다면 $d_4=48$ mm에서와 같이 $d_4=49$ mm

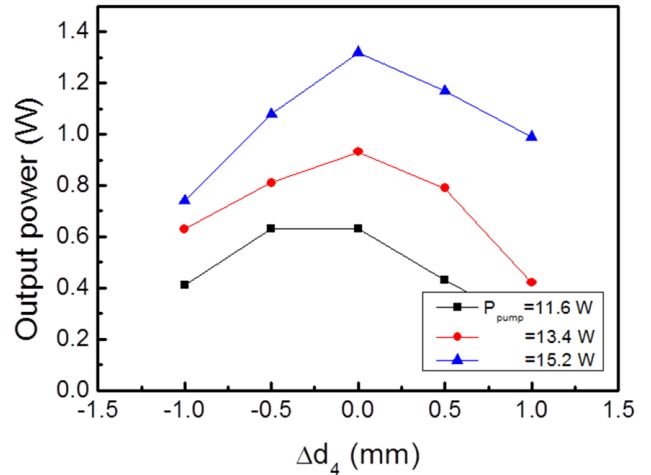


FIG. 5. Output power of the laser as a function of Δd_4 .

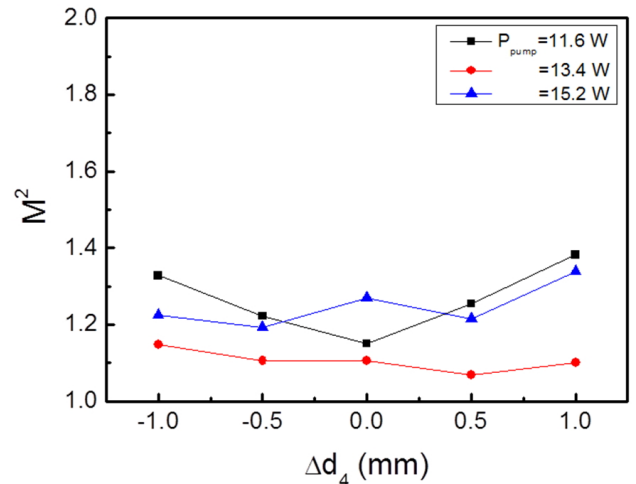


FIG. 6. Beam quality (M^2) of the laser as a function of Δd_4 .

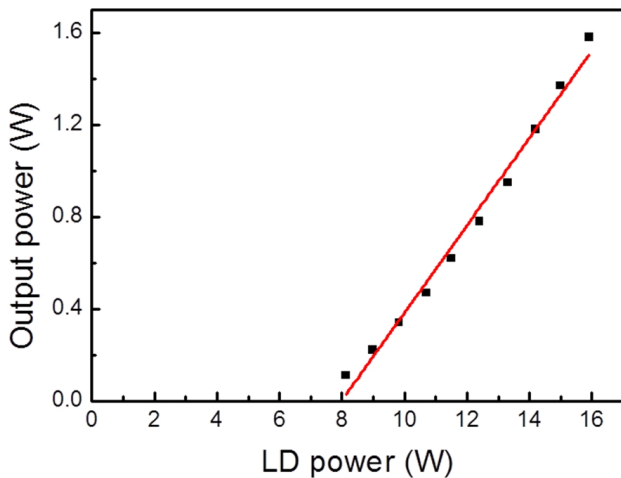


FIG. 7. Output power of the laser when LD pump power increases.

지점에서 258~270 μm 크기의 레이저 빔이 발생해야 하지만 더 작은 크기의 레이저 빔이 발생했다. 만약 같은 레이저 빔 크기로 발진했다면 $d_4=49\text{ mm}$ 지점에서 M^2 는 1.9~2.1 값을 가졌을 것이다. 집속된 펌프 광의 직경 크기에 의해 고차 모드의 발진 억제 이외의 또 다른 종류의 손실이 있음을 의미한다. 많이 연구된 공진기 손실 중 하나는 열 복굴절에 의한 손실이다. 선편광기가 설치된 공진기에서는 열복굴절에 의한 편광왜곡 때문에 공진기 손실이 발생한다. 공진기 손실의 크기는 공진 모드의 종류에 따라 크기가 다르다. 고차모드가 많은 다중모드 빔은 같은 크기의 가우시안 빔보다 열복굴절에 의한 공진기 손실이 크다^[12]. 따라서 상대적으로 가우시안 빔 크기가 작은 $d_4=49\text{ mm}$ 지점에서는 $d_4=48\text{ mm}$ 지점보다 고차모드들이 많이 존재할 수 있기 때문에 손실이 많았을 것으로 추정된다. 따라서 $\Delta d_4 > 0$ 영역에서 고차모드가 발생할 조건은 되었지만 추가적인 열복굴절에 의한 공진기 손실이 고차모드 발진을 억압했을 것으로 판단된다. 이 원인으로 인해 $\Delta d_4 > 0$ 영역에서 상대적으로 펌프광 크기에 비해 작은 크기를 갖은 고차 모드들도 발진하기 어려워져서 레이저 출력이 감소한 것으로 판단된다.

Figure 7은 공진기 최적조건인 QWP의 회전 각(θ)이 약 7도, $\Delta d_4=0$ 일 때, 선편광된 레이저 출력이다.

Figure 7의 출력에 대한 기율기 효율은 19%이다. 일반적으로 선 편광되지 않는 레이저에서 특정방향의 선광된 출력을 얻기 위해서 선편광기를 공진기 외부에 설치하면 선 편광된 출력은 1/2 감소하게 된다. 본 연구에서 제안된 선편광 레이저의 출력은 기율기 효율이 38%인 비편광된 레이저의 출력을 편광기에 투과시켜 얻을 수 있는 효율과 같다.

IV. 결 론

본 연구에서는 모드 잠금 펄스 발생과 고조파 발생에 활용될 수 있는 레이저로 편광기와 1/4 파장판을 이용한 선편광

된 긴 공진기형 Yb:YAG 레이저 구조를 제안하고 최적화하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서 연구된 공진기 길이는 3.7 m이었다. 레이저 출력의 최적화를 위해서 렌즈 L_3 의 초점위치에 설치된 반사거울 M_4 의 미세변화에 대한 공진기 안정도 분석과 출력 특성을 분석하였다. 레이저 발진을 위한 최소 펌프광 LD 출력은 8 W이고 레이저 출력은 19%의 기율기 효율을 가졌다. 그리고 최적 조건에서 빔질(M^2)은 펌프광의 세기에 따라 약 1.1~1.3의 값을 가지고 있어 출력 빔의 강도 분포는 준 가우시안 빔의 모양을 가지고 있다. 향후 본 연구에서 설계한 레이저 공진기의 반사거울 M_4 위치에 SESAM을 설치하고 모드 잠금 실험을 할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

1. W. Koechner and M. Bass, *Solid-State Lasers* (Springer-Verlag, New York, USA, 2003).
2. A. Giesen, H. Hiige, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower, "Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers," *Appl. Phys. B* **58**, 365-372 (1994).
3. W. F. Krupke, "Ytterbium solid-state lasers-the first decade," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **6**, 1287-1296 (2000).
4. J. Meijera, K. Dub, A. Gillnerc, D. Hoffmannc, V. S. Kovalenkod, T. Masuzawae, A. Ostendorfc, R. Poprawec, and W. Schulz, "Laser machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons," *Opt. Commun.* **51**, 531-550 (2002).
5. D. Bauer, I. Zawischa, D. H. Sutter, A. Killi, and T. Dekorsy, "Mode-locked Yb:YAG thin-disk oscillator with 41 μJ pulse energy at 145 W average infrared power and high power frequency conversion," *Opt. Express* **20**, 9698-9704 (2012).
6. X. Liu, D. Du, and G. Mourou, "Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses," *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 1706-1716 (1997).
7. U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Honninger, N. Matuschek, and J. Aus der Au, "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **2**, 435-453 (1996).
8. H. A. Haus, "Parameter ranges for CW passive mode locking," *IEEE J. Quantum Electron.* **12**, 169-176 (1976).
9. C. Y. Ahan, H. C. Kim, H. B. Lim, and H. S. Kim, "Output characteristics of a Yb:YAG laser Q-switched by a semiconductor saturable absorber and an output coupler composed of a polarizer and a quarter-wave plate," *Korean J. Opt. Photon.* **25**, 90-94 (2014).

10. C. Y. Ahan, D. J. Moon, M. J. Kim, and H. S. Kim, "Output characteristics of a Yb:YAG disk laser with a curved dichroic mirror for a longitudinal pumping," *New Physics: Sae Mulli (The Korean Physical Society)* **62**, 142-147 (2012).
11. H. Kogelik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Appl. Opt.* **5**, 1550-1567 (1966).
12. R. Hua, S. Wada, and H. Tashiro, "Principles and limitations of a quarter-wave plate for reducing the depolarization loss from thermally induced birefringence in Nd:YAG lasers," *Opt. Commun.* **175**, 189-200 (2000).