New Physics: Sae Mulli,
Vol. 71, No. 9, September 2021, pp. 787∼793
http://dx.doi.org/10.3938/NPSM.71.787

Output Optimization of a Q-switched Composite YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser

Youngin Park
R&D Advanced Optical Research Team, Lutronic Corporation, Goyang 10534, Korea

Seongsu Kim · Sungtae Park · Jeonghyeon Jang · Myeongjae Jang · Hyun Su Kim*
Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

(Received 06 May 2021 : revised 12 July 2021 : accepted 27 July 2021)

We investigated the optimal parameters of a Q-switched, a composite YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser. In order to design a compact and robust Q-switched Yb:YAG laser, a composite YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser medium fabricated by thermal diffusion bonding was used. The noise term was considered in the rate equation for numerical analysis of the effect of noise magnitude acting as the initial signal of the laser pulse. The optimal laser parameters of a composite YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser were determined through an analysis of a modeled Q-switched laser and the experimental results. The Q-switched laser with laser parameters such as output mirror reflectivity, resonator length, and pump beam size optimised could generate a peak power of 0.63 MW with an output energy of ∼1.1 mJ and a pulse duration of ∼1.7 ns.

Keywords: Q-switching, Composite crystal, Laser, Laser optimization, Yb:YAG

Q–스위칭된 일체형 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG 레이저 출력 최적화에 대한 연구

박영인
(주)루트로닉 첨단광학연구팀, 고양 10534, 대한민국

김성수 · 박성태 · 장정현 · 장명재 · 김현수*
조선대학교 광기술공학과, 광주 61452, 대한민국

(2021년 5월 06일 받음, 2021년 7월 12일 수정본 받음, 2021년 7월 27일 게재 확정)

본 논문에서는 일체형 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG 레이저 매질을 이용한 Q-스위치 레이저에 대한 최적 설계 파라미터들을 조사하였다. Q-스위칭된 Yb:YAG레이저를 소형화하고 견고하게 설계하기 위해 열확산 접합방식으로 제작된 일체형 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG 레이저 매질을 사용하였다. 레이저 펄스의 초기 신호 역할을 하는 노이즈 크기 효과 수치 분석을 위해 율방정식에 노이즈 항을 고려하였다. 일체형 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG 레이저 출력 최적화를 위한 최적 레이저 파라미터들은 Q-스위칭 레이저 모델의 수치 분석 및 실험 결과 분석을 통해 결정되었다. 일체형 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG 레이저 매질로 구성된 Q-스위칭 레이저는 출력경 반사율, 공진기 길이 및 펌프 빔크기와 같은 레이저 파라미터들을 최적화함으로써 출력 에너지 약 1.1 mJ, 펄스 폭 약 1.7 ns의 출력으로 발진하였다.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Keywords: Q-스위칭, 일체형 매질, 레이저, 레이저 최적화, Yb:YAG

I. 서 론

Q–스위칭 레이저 펄스 발생 기술은 레이저가 처음 개발된 1960년 이후 1962년에 걸쳐 실험적으로 개발되었다 [1, 2]. 그 후 많은 연구 개발을 통해 Q–스위칭 레이저 펄스 발생 기술이 발전하였다. Q–스위칭 레이저 펄스는 매우 짧은 시간에 큰 에너지를 방출하는 특징으로 의료, 광 리소그래피, 자동차 센서 및 엔진, 장거리 원격 측정 및 거리 측정 분야 등 다양한 산업 분야에 활용되고 있다 [3–11]. 의료 분야에서는 적외선 영역의 파장을 이용한 레이저를 많이 사용하며 주로 안과, 신경외과 등 다양한 분야에 대한 정밀치료용 레이저가 개발되고 있다 [3,4]. 광 리소그래피 분야에서는 레이저 간섭 리소그래피, 마이크로/나노 구조의 레이저 가공 및 제작 등 여러 분야에서 개발되고 있다 [5–7]. 자동차 센서 및 엔진 분야에서는 최근 자율 주행 자동차에 쓰이는 라이다 센서나 엔진 점화용 레이저로도 많이 연구되고 있다 [8–11].

여러 분야에서 많이 사용되고 있는 Q–스위칭 레이저는 이득 매질로 Nd:YAG와 Yb:YAG가 많이 연구되고 있으며, 소형으로 제작하기 위해 일체형 레이저 매질이 많이 연구되고 있는 추세이다 [12–18]. Nd:YAG는 Yb:YAG에 비해 발진 문턱이 낮은 장점이 있지만, 고출력을 내기 위해서는 높은 출력의 펌프 광원이 필요하다. 반면에 Yb:YAG는 레이저 상 준위의 긴 이완시간(~1 ms)을 가지고 있어서 저출력의 펌프 광원을 이용해서 고출력 Q–스위칭 펄스를 만들 수 있는 장점이 있다 [19]. 이러한 레이저 이득 매질을 활용한 Q–스위칭 기술은 크게 두 가지로 능동형과 수동형 기술이 있다. 능동형 Q–스위칭 기술은 전기적 장치나 변조기를 이용해 공진기 내부의 인위적인 손실을 주어 Q–스위칭을 달성한다. 수동형 Q–스위칭 기술은 공진기 내부에 포화 흡수체를 삽입하여 인위적인 손실을 주어 Q–스위칭을 달성한다. 높은 빔 질과 높은 첨두 출력을 갖는 수동형 Q–스위칭 레이저는 레이저 가공, 레이저 점화, 비선형 결정을 이용한 효과로 효율적인 주파수 변환 등에 광범위하게 적용될 수 있다 [20]. 또한, 능동형 Q–스위칭 레이저와 비교하면 구조적인 면에서 보다 소형으로 만들기 용이하고 짧은 펄스 폭 발생이 가능하다. 그리고 수동형 Q–스위칭 레이저는 능동형 Q–스위칭 레이저 필요한 전기적 장치나 변조기가 필요 없기 때문에 저비용으로 제작할 수 있는 장점이 있다.

*E-mail: hskim21@chosun.ac.kr

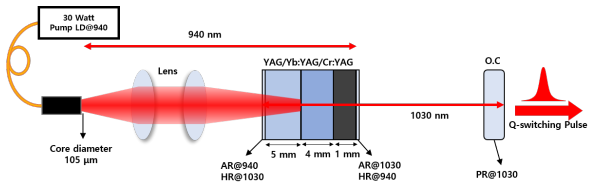


Fig. 1. (Color online) Schematic diagram of the passively Q-switched laser with a composite YAG/Yb:YAG/Cr:YAG.

본 연구에서는 저출력의 펌핑 광원으로도 높은 출력의 Q–스위칭 펄스를 만들 수 있는 이득매질 Yb:YAG을 사용하고 Cr:YAG를 Q-스위처로 사용한 Q–스위칭 레이저에 대한 펄스 레이저 출력 최적화를 연구하였다. 레이저 공진기 길이를 소형화하기 위해 레이저 매질은 일체형 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG를 사용하였다. 최적의 출력 조건을 얻기 위해 레이저 공진기 길이, 레이저 출력 거울의 반사율과 펌프 빔 직경과 같은 여러 매개 변수를 바꾸어 가며 최적화 조건을 구하는 연구를 수행하였다.

II. 일체형 매질 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG를 이용한 Q-스위칭 레이저

YAG/Yb:YAG/Cr:YAG는 소형화와 레이저 정렬 문제를 해소하기 위해 Cr:YAG 포화 흡수체를 Yb:YAG에 열 확산 접합 (Thermal diffusion bonding)한 일체형 레이저 매질을 사용하였다. Figure 1은 Q–스위칭된 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG 레이저 구성도이며 크게 펌핑부와 레이저 공진기 부분으로 나누어진다.

레이저 펌핑 구조는 고차 횡 모드를 줄이기 위해 종 펌핑을 사용하였고, 30 W 급의 940 nm LD가 사용되었다. 펌핑 지속 시간은 Yb:YAG의 형광 수명 시간을 고려하여 1.2 ms의 펄스 폭으로 유지하였고, 마운트의 냉각조건을 고려하여 반복률은 30 Hz로 고정하였다. 펌핑용 광섬유 코어 직경은 105 μm, 개구수 (NA)는 0.22이다. 그리고 펌프 빔은 두 개의 렌즈를 거쳐 YAG를 통과하여 Yb:YAG에 집속된다. 두 개의 렌즈 중 첫 번째 평볼록 렌즈의 초점 거리는 15 mm로 고정하고 두 번째 볼록평 렌즈는 20 mm – 40 mm까지의 렌즈들을 이용해 펌프 빔 크기를 조절하면서 실험하였다. 렌즈와 레이저 매질 사이의 거리는 두번째 렌즈의 초점거리가 되도록 조정하였다. 공진기에서는 이득 매질로써 4 mm의 길이인 Yb:YAG 5 at.% 도핑율을 가진 레이저 크

리스탈을 사용하였다. 펌핑 반복률에 따른 레이저 크리스탈에서 발생한 열을 방출시키기 위해 Yb:YAG의 좌측 끝면에는 공기보다 열전도율이 약 560배 더 우수한 YAG를 융착시켰고, 일반적으로 열 전도성이 우수한 구리 마운트에 수관을 연결하여 냉각하였다. YAG에서 집속 렌즈와 마주한 면은 940 nm와 1030 nm에 대해서 각각 무반사 (AR), 고반사 (HR)로 코팅되어있다. 포화 흡수체인 Cr:YAG의 초기 투과율은 70%이며, 출력 거울과 마주한 면에는 940 nm와 1030 nm에 대해서 각각 고반사 (HR), 무반사 (AR) 코팅이 되어있다. 이로 인하여 단일 패스 당 Yb:YAG가 흡수하지 못한 940 nm에 대한 잔여 펌프 광을 한 번 더 반사하여 흡수할 수 있게 된다. 출력 거울은 다양한 반사율을 가진 평면거울을 사용하여 레이저 출력 특성을 조사하였다.

III. 여러 매개 변수를 활용한 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG 레이저 최적화

YAG/Yb:YAG/Cr:YAG를 이용한 Q–스위칭 레이저 출력을 최적화하기 위해 레이저 설계 변수 공진기 길이, 반사율, 펌프 빔 직경을 변화시켜 출력 특성을 조사하였다. 공진기 길이는 매질의 광학적 손상을 최소화하기 위해서 25 mm에서 50 mm까지 변화하면서 레이저 출력을 조사하였다. 반사율은 출력 거울에서 반사되는 공진기 내부의 에너지가 크면 매질 표면에 유전체 코팅에 손상을 주기 때문에 출력경의 반사율은 15%에서 40%까지 범위 안에서 사용하였다. 펌프 빔 직경은 LD의 사양을 고려하여 0.14 mm, 0.21 mm, 0.28 mm의 크기로 정하여 실험하였다.

Q-스위칭 레이저 펄스 출력 특성은 일반적으로 많이 알려진 레이저 율 방정식으로 설명된다 [12]. 일반적으로 이 율 방정식을 수치적 해석하기 위해서 펄스 레이저 발생을 위한 초기 신호($\phi(0)$)가 되는 노이즈 신호 크기를 임의의 상수 값으로 설정하고 수치 계산하게 되어 상수 값의 크기에 따라 수치 계산 결과가 차이가 있다. 또한 노이즈 신호의 증폭된 자발 방출(ASE) 효과에 의한 반전 밀도 감소에 의한 출력 변화가 고려되어 있지 않다. 본 연구에서는 Eq. (1)에서 일반적인 레이저 율 방정식에서 펄스 레이저를 발생시키기 위한 초기 노이즈 신호로 자발 방출광이 공진기를 왕복해서 증폭된 광자 밀도 ϕ_{ASE}를 사용하였다 [21]. 수치계산에 사용된 레이저 율 방정식은 다음식과 같다 [12].

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r}[2\sigma_g n_g l_g - 2\sigma_s n_s l_s - 2\sigma_{es}(n_{s0} - n_s)l_s - (L - \ln R)] + \frac{\phi_{ASE}}{t_r} \cdot \eta \quad (1)$$

$$\frac{dn_g}{dt} = W_p - \frac{n_g}{\tau_g} - \gamma_g \sigma_g c \phi n_g \quad (2)$$

$$\frac{dn_s}{dt} = \frac{n_{s0} - n_s}{\tau_s} 0 \gamma_s \sigma_s c \phi n_s \cdot \frac{A_g}{A_s} \quad (3)$$

$$\frac{\phi_{ASE}}{t_r} = \frac{\Omega}{4 \cdot t_r \cdot c} \cdot \frac{1}{\tau_g \sigma_g} \cdot \frac{G_0}{(\ln G_0)^{1/2}} \quad (4)$$

여기서, ϕ는 이득 매질의 광자 밀도, n_g는 이득 매질의 밀도 반전, n_{s0}는 포화 흡수체의 바닥 상태 원자 수, σ_g는 이득 매질의 유도 방출 단면적, σ_s는 포화 흡수체의 바닥 상태 흡수 단면적, σ_{es}는 포화 흡수체의 여기 상태 흡수 단면적, l_g는 이득 매질의 길이, l_s는 포화 흡수체의 길이, c는 빛의 속도, τ_g는 이득 매질의 여기 상태 수명 시간, τ_s는 포화 흡수체의 여기 상태 수명 시간, t_r는 공진기 왕복 시간, h는 플랑크 상수, λ는 레이저 파장, λ_p는 LD 펌프 파장, γ_g는 이득 매질의 반전 감소 계수, γ_s는 포화 흡수체의 반전 감소 계수, A_g는 이득 매질의 빔 단면적, A_s는 포화 흡수체의 빔 단면적, l_c는 공진기 길이, R은 출력 거울의 반사율, L은 공진기 왕복 손실, W_p는 펌핑율이며, 펌핑율은 Yb:YAG의 양자 효율인 η_Q에 따라 효율이 정해진다 [12,19,22]. L은 Findlay–Clay 방법을 사용하여 실험적으로 얻을 수 있다 [19]. 하지만 공진기 손실 측정을 위해 반사율이 다른 출력 거울들이 필요하며 실험적 오차가 발생할 수 있다. 이러한 불확실하지만 중요한 매개 변수 때문에 가우시안 빔을 가정한 수치 해석 계산 결과와 실험 결과 사이에서 오류가 생길 수 있다. 그리고 포화 흡수체의 원자 수는 참고문헌 [19]에서 포화 흡수체의 초기 투과율 관련 식으로 구할 수 있다. Equation (4)의 Ω와 G_0는 각각 왕복 증폭 후의 입체각과 소신호 증폭률을 나타낸다. Equation (4)의 ASE는 Q-스위칭 펄스가 발진하기 전까지 반전 밀도가 Eq. (2)과 같이 지수함수적으로 감소하면서 발생한다. 그러나 실험에서는 공진 모드들의 간섭에 의해 무작위적으로 발생하는 스파이크(spike) 형태를 갖는 초기 신호들의 상대적 크기가 Q-스위칭의 펄스 형성에 영향을 준다. 따라서 초기 신호의 상대적 크기의 요동에 의한 효과를 고려하기 위해 Eq. (1)의 ASE 항에 크기 요소 η를 곱하였다. 수치계산 결과 값에 따라 레이저 출력 값에 영향을 주지만 각 설계 매개 변수 변화에 대한 레이저 출력 경향에는 영향을 주지 않았다. 수치계산에 사용된 사용된 매개변수는 실험에 사용한 매질에 대한 물리상수 및 측정값을 이용했고 Table. 1에 표시하였다.

Figure 2는 서로 다른 출력경 반사율에 대한 공진기 길이에 따른 레이저 출력을 측정한 결과이다. 이때 펌프 빔 크기는 0.14 mm로 하였다.

Figure 2(a)의 실험 데이터는 공진기 길이와 반사율에 따라 공진기 손실로 인해 출력 에너지가 감소하는 경향을

Table 1. Physical parameters of YAG/Yb:YAG/Cr:YAG

Parameter (unit)	YAG/Yb:YAG/Cr:YAG	Parameter (unit)	YAG/Yb:YAG/Cr:YAG
σ_g (cm^2) [12]	2.1× 10^{-20}	L [19]	0.9
σ_s (cm^2) [12]	4.6 × 10^{-18}	h (J s)	6.626 × 10^{-34}
σ_{es} (cm^2) [12]	8.2 × 10^{-19}	λ (μm)	1.030
l_g (cm)	0.4	λ_p (μm)	0.940
l_s (cm)	0.1	γ_g [12]	1
τ_g (s) [19]	951 × 10^{-6}	γ_s [12]	1
τ_s (s) [12]	3.4 × 10^{-6}	c (cm/s)	3 × 10^10
n_{s0} [19]	0.775 × 10^18	Q [22]	0.932

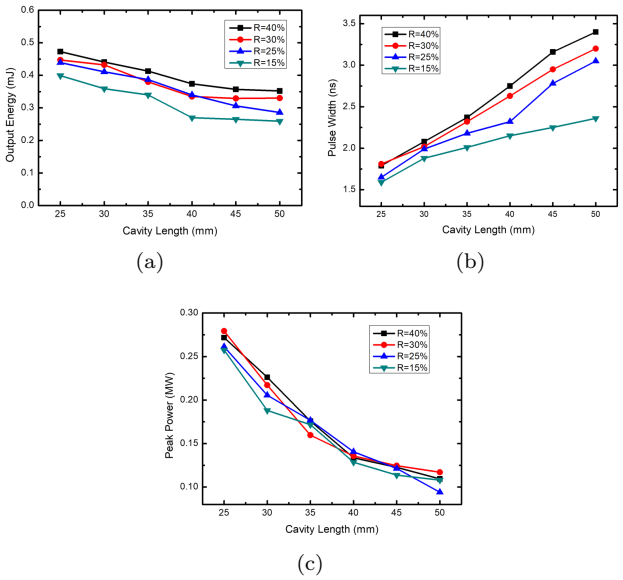


Fig. 2. (Color online) Output characteristics of the Q-switched YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser with respect to cavity length for various output coupler reflectivity. (a) Output energy, (b) pulse width, and (c) peak power of the designed laser.

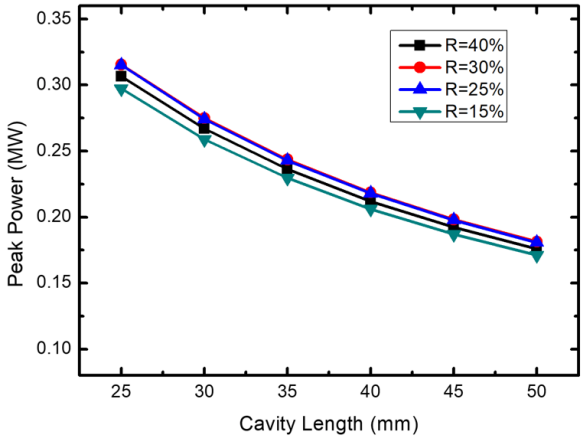


Fig. 3. (Color online) Numerical analysis results of the Q-switched YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser output peak power according to cavity length changes for various output coupler reflectivity.

가졌다. 일반적으로 공진기 길이가 증가함에 따라 공진기 내부의 회절 손실은 커진다. 이로 인해 출력 에너지가 내려간 것으로 판단된다 [19]. 레이저의 펄스폭은 일반적인 수동형 Q-스위칭 이론과 같이 공진기 길이가 늘어남에 따라 펄스 폭이 증가하는 동일한 경향을 보였다 [19]. Figure 2(c)의 첨두 출력 값은 출력 에너지를 펄스 폭으로 나누어 얻은 결과이다. 공진기 길이가 늘어남에 따라 에너지는 소폭 감소하고 펄스 폭이 크게 늘어나서 첨두 출력은 감소하는 경향으로 나타났다. Figure 2(c)는 공진기 길이 25 mm, 출력경 반사율 30%에서 최대 첨두 출력이 발생함을 보여주고 있다.

공진기 길이 25 mm, 출력경 반사율 30%에서 최고의 첨두 출력이 발생하는 것을 해석하기 위해 Eq. (1)부터 Eq. (3)까지의 레이저 율 방정식을 이용해 첨두 출력을 조사하였다. 미분 방정식의 해를 구하기 위해 4차 Runge–Kutta 방법을 이용하였다. 수치 해석에서 사용한 Table. 1의 공진기 손실 항인 L은 공진기 길이 25 mm에서 Findlay-Clay [19] 방법을 이용해 측정한 값이다. 모든 조건에 대해 정확한 수치해석을 하기 위해서는 실험에 사용한 모든 공진기 길이에 대해 L을 구하야 하지만 측정의 어려움 때문에 최저 공진기 길이 25 mm에 대해서만 조사하였다. 일반적으로 회절 손실은 공진기 길이가 길수록 증가하기 [19] 때문에 L는 공진기 길이 25 mm에서 더 증가할수록 손실이 증가할 것으로 판단된다. 수치 계산된 첨두 출력 특성은 Fig. 3과 같다. 실험결과와 같이 공진기 길이가 증가할수록 출력은 감소하였다. 또한 공진기 길이 25 mm, R 크기가 25%에서 30%사이에서 최대 첨두 출력이 발생함을 보였다. 실험 결과와 약간의 차이를 보였지만 전반적으로 실험 결과와 같은 경향을 보였다.

다음은 펌프 빔 직경과 공진기 길이에 따른 펄스 폭과 첨두 출력에 대한 결과는 그래프 Fig. 4에 나타내었다. 수치 해석은 앞서 언급한 바와 같이 공진기 손실에 대해서 공진기 길이 25 mm에서 측정된 손실과 같다고 가정하고 계산하였다. 펌프 빔 직경이 커짐에 따른 펄스 폭은 큰 영향을 받지

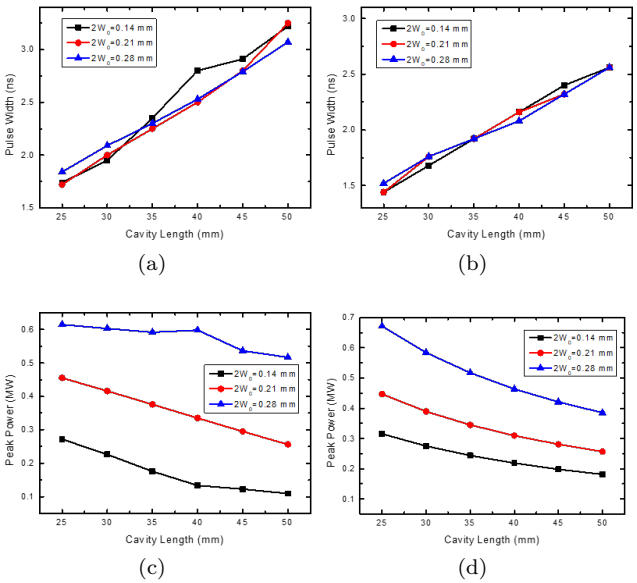


Fig. 4. (Color online) Output characteristics of the Q-switched YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser according to cavity length changes for various pump beam diameters. (a) Experimental and (b) numerical results of pulse width and (c) experimental and (d) numerical results of peak power.

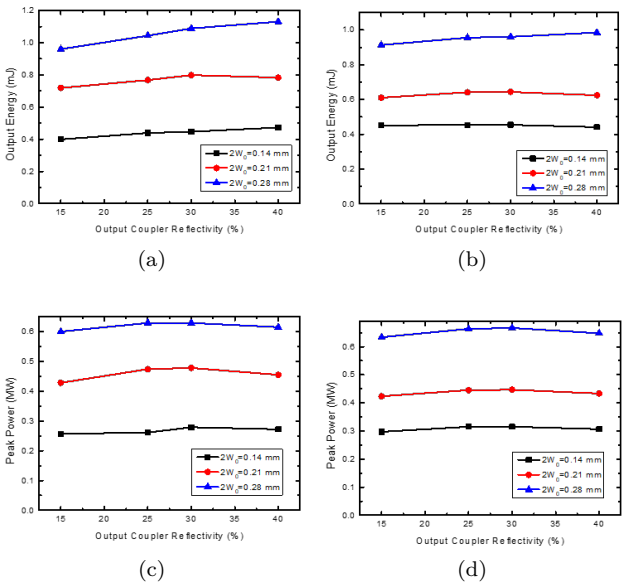


Fig. 5. (Color online) Output characteristics of the Q-switched YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser according to output coupler reflectivity changes for various pump beam diameters. (a) Experimental and (b) numerical results of output energy and (c) experimental and (d)numerical result of peak power.

않았지만 공진기 길이가 늘어나면 증가하는 경향을 보였다. 첨두 출력은 펌프 빔 직경이 클수록 높았고 공진기 길이가 늘어남에 따라 감소하는 경향을 보였다.

앞에서 기술된 레이저 공진기 길이와 반사율, 공진기 길이와 펌프 빔 직경 변화에 대한 출력 분석 결과로부터 공진기 길이가 25 mm였을 때 가장 좋은 첨두 출력 특성을 가졌다. 즉, 공진기 길이가 짧을수록 첨두 출력이 높아지는 경향을 보여주었다. 그러나 공진기 길이를 너무 짧게 하면 공진기 내부에서 펄스 에너지가 강하게 발진하기 때문에 매질에 광학적 손상을 입을 수 있다. 본 연구에서는 공진기 길이가 25 mm이하로 하면 공진기 내부에서 레이저 빔에 의한 광학적 손상이 발생했다. 따라서 공진기 길이를 25 mm로 고정시키고 펌프 빔 직경과 반사율에 따른 출력 특성을 분석하였다.

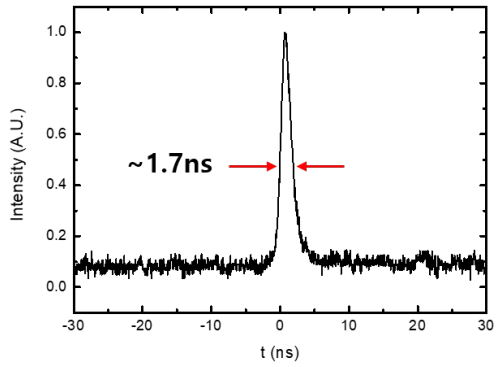
Figure 5은 공진기 길이를 25 mm에서 펌프 빔 직경과 반사율에 따른 레이저 출력 특성을 나타낸 것이다. 반사율이 30%였고 펌프 빔 직경이 0.28 mm에서 첨두 출력이 가장 높은 0.63 MW였다. 4차 Runge–Kutta 방식을 이용한 율방정식 수치 결과도 실험과 유사하게 반사율 30%근처에서 최대 첨두 출력이 나왔다. 펄스 폭은 공진기 길이 의존성이 크고 출력 에너지는 펌프 빔 직경에 크게 의존한다. 출력 에너지는 펌프 빔 직경이 클수록 증가하는 경향을 가졌다. Figure 2에 나타나 있는 실험 결과와 같이 반사율은 증가할수록 출력 에너지가 증가하지만 펄스 폭도 증가하는 경향을 가지고 있기 때문에 특정 반사율 값에서 레이저 첨두출력은 최대에 도달하게 된다.

Figure 6은 최적 조건인 레이저 공진기 길이 25 mm, 펌프 빔 직경 0.28 mm, 출력경의 반사율 30%에서의 펄스 폭과 빔 질을 측정한 결과이다. 측정된 펄스 폭은 약1.7 ns이고, 출력 변동 평균값은 1.69%, 빔질은 1.53으로 측정 계산되었다.

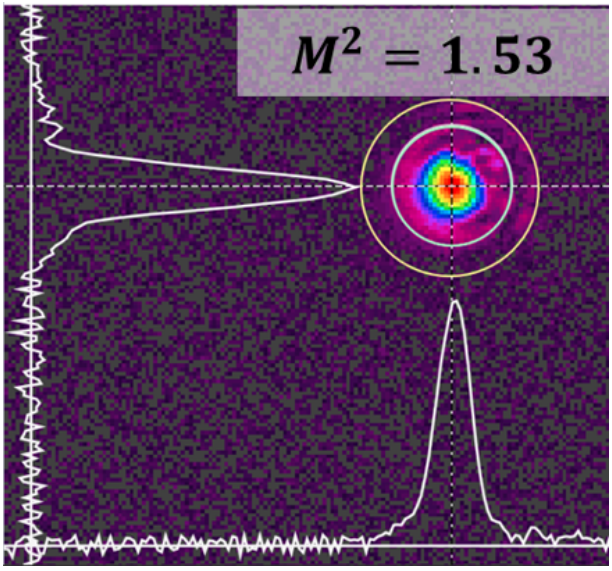
레이저 공진기 길이 25 mm 이하에서의 레이저 발진 실험은 각 광학부품의 코팅의 광학손상에 의해 진행할 수 없었다. 그러나 일체형 레이저 매질의 유전체 코팅의 손상 임계 값이 1 GW/cm^2 이상인 이온빔 코팅을 하면 공진기 길이를 25 mm 이하에 고출력을 낼 수 있을 것으로 판단된다. Figure 7은 짧은 공진기 조건에서 출력경 반사율 변화에 따른 첨두 출력분석 결과이다. 수치계산에 사용된 공진기 길이와 펌프 빔 직경은 각각 10 mm와 0.28 mm이다. Figure 7는 최적 조건에서 레이저 첨두 출력이 레이저 공진기 길이 25 mm보다 2배 정도 증가함을 보여준다. 또한 노이즈 신호의 상대적 크기에 따른 레이저 출력경의 반사율 최적 조건이 η 크기에 무관함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 수치해석 결과를 바탕으로 한 일체형 YAG/Yb:YAG/Cr:YAG 레이저 공진기의 Q-스위칭 펄스



(a)



(b)

Fig. 6. (Color online) (a) Temporal and (b) spatial profiles of the Q-switched YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser output.

출력 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 레이저 최적화를 위한 공진기 설계 변수로는 공진기 길이, 출력 거울의 반사율, 펌프 빔 직경을 변경해가며 최적화를 진행하였다. 본 연구에서 사용된 일체형 레이저 매질은 공진기 길이 25 mm, 출력 거울 반사율 30%, 펌프 빔 직경 0.28 mm에서 최대 출력을 발생하였다. 이때 펄스 에너지는 약 1.09 mJ, 펄스 폭은 약 1.7 ns, 첨두 출력은 약 0.6 MW, 빔 질은 1.53 이었다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2020R1F1A1056567).

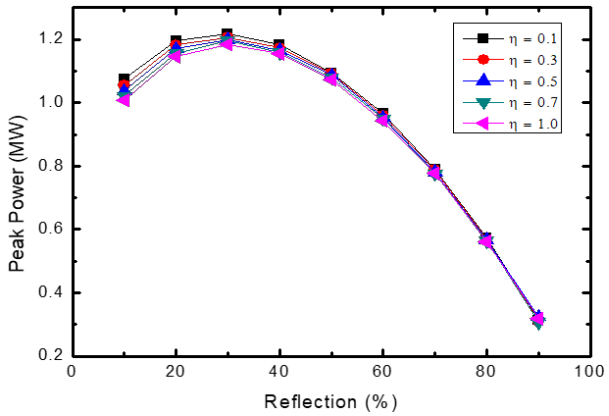


Fig. 7. (Color online) Numerical analysis results for the Q-swiched YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser output peak power according to output coupler reflectivity changes for various noise scale factor(η) values.

REFERENCES

[1] Taylor and Nick, LASER: The inventor, the Nobel laureate, and the thirty-year patent war (Simon & Schuster, New York, USA, 2000).
[2] F. J. McClung and R. W. Hellwarth, J. Appl. Phys., **33**, 828 (1962).
[3] Goldman and Leon, Biomedical Aspects of the Laser (Springer Publishing, New York, USA, 1967).
[4] A. Saha *et al.*, Appl. Phys. B **87**, 431 (2007).
[5] L. Yang *et al.*, Nanomaterials, **9**, 1789 (2019).
[6] H. G. Rhee, Direct Laser Lithography and Its Applications (Intechopen, London, UK, 2018).
[7] J. H. Seo *et al.*, J. Nanosci. Nanotechnol., **14**, 1521 (2014).
[8] R. T. H. Collis, Appl. Opt, **9**, 1782 (1970).
[9] J. D. Dale, P. R. Smy, and R. M. Clements, SAE International 780329, 1539 (1978).
[10] J. D. Dale and P. R. Smy, in Laser Ignition Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper T3A.1.
[11] N. Pavel *et al.*, Prog. Quantum. Electron., **58**, 1 (2018).
[12] M. Tsunekane and T. Taira, IEEE J. Quantum Electron., **49**, 454 (2013).
[13] N. Pavel *et al.*, Opt. Express, **23(26)**, 33028 (2015).
[14] J. Dong, Y. Ren, G. Wang, and Y. Cheng, Laser Phys. **10**, 105817, 1 (2013).

[15] W. Jiang *et al.*, Appl. Opt, **54(7)**, 1834 (2015).
[16] X. Li *et al.*, J RUSS LASER RES, **38**, 387 (2017).
[17] J. Dong, Y. Ren, and H Cheng, Laser Phys. **24**, 055801, 1-4 (2014).
[18] J. Ma, J. Dong, K.-i. Ueda, and A. A. Kaminskii, Appl. Phys. **105**, 749 (2011).
[19] W. Koechner and M. Bass, Solid-State Lasers: A Graduate Text (Springer Publishing, New York, USA, 2003), Chap. 1-Chap. 4, Chap. 8.
[20] H. Kofler *et al.*, Laser Phys. Lett. **4**, 322-327 (2007).
[21] G. J. Linford, E. R. peressini, W. R. Sooy, and M. L. Spaeth, Appl. Opt, **13**, 379 (1974).
[22] N. P. Barnes and B. M. Walsh, OSA TOPS, **68**, Advanced Solid-State Lasers. 284 (2002).
[23] A. G. Fox and T. Li, Bell Syst. tech. j., 453-489 (1961).
[24] L. A. Vainshtein, Sov. Phys. - JETP, **17**, 709 (1963).
[25] T. Li, Bell Syst. tech. j., 917-932 (1965).