

수동 큐스위칭 Nd:YAG 레이저에서 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG의 초기 광흡수 효과와 출력 특성

최영수[†] · 윤주홍 · 김기홍

국방과학연구소

Ⓣ 305-600 대전광역시 유성구 사서함 35-5

(2002년 3월 14일 받음, 2002년 6월 13일 수정본 받음)

초기투과도 0.48과 0.38인 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG를 사용한 수동 큐스위칭 Nd:YAG 공진기에서 포화흡수체의 초기 광흡수 효과로 낮은 Q-상태에서 나타나는 포화흡수체의 투과 광손실 변화와 더불어 레이저 매질의 펌핑된 밀도반전 상태를 분석하였다. 포화흡수체의 초기 광흡수로 수동 큐스위칭 열림동작때 나타나는 포화흡수체의 투과도는 각각 0.70±0.01과 0.62±0.01이었다. 이는 큐스위칭 레이저 공진기의 초기 광손실이 감소함을 의미한다. 큐스위칭 열림동작 시점에서 측정된 두 Cr⁴⁺:YAG의 기저상태 Cr⁴⁺ 밀도수는 약 1.4×10¹⁷ cm⁻³이고 기저상태에 대한 여기상태의 Cr⁴⁺ 이온밀도수의 비는 약 44%이었다. 또, 큐스위칭 펄스 발생을 위해 펌핑된 최소 반전밀도수는 각각 3.6×10¹⁷과 3.9×10¹⁷ cm⁻³이고 양자추출효율은 두 경우 모두 약 0.32였다. 낮은 Q-상태에서 나타나는 포화흡수체의 광흡수 효과를 고려한 수동 큐스위칭 레이저 출력에너지의 수정 이론값은 각각 18과 18.5 mJ로 측정된 실험값 약 17±1과 18±1.5 mJ과 잘 일치함을 보였다.

주제어 : saturable absorber, Cr⁴⁺:YAG, amplified spontaneous emission, population inversion density, initial absorbing effect.

I. 서 론

효율적이고 높은 침투출력을 지닌 소형 경량화된 고체레이저 개발을 위해, 최근 새로운 수동 큐스위칭 고체소자인 Cr⁴⁺:YAG를 사용한 1 μm 파장 대역의 Nd:YAG,^[1-10] Yb:YAG,^[9] Nd:YVO₄,^[10,11] 그리고 Nd:Glass^[12,13] 레이저에 대한 출력특성과 Cr⁴⁺:YAG의 포화특성에 대한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다.^[14-19] 수동 큐스위칭 레이저의 출력특성은 공진기의 펌핑조건과 포화흡수체의 포화특성에 의존한다. 따라서, 수동 큐스위칭 레이저 출력의 최적화를 위해 레이저 이득매질의 특성과 더불어 포화흡수체의 기저상태와 여기상태의 흡수특성에 대한 연구가 매우 중요하다.^[20-24] 효율적 수동 큐스위칭 동작을 위해 레이저매질의 충분한 밀도반전과 더불어 레이저 발진 파장에서 포화흡수체의 높은 포화흡수가 즉시 일어나야 한다. 그러나, 높은 Q-상태에서 포화흡수체의 포논에 의한 광자 흡수, 여기상태 흡수, 그리고 기저상태의 불포화는 수동 큐스위칭 동작과정에서 공진기의 내부 광손실로 작용하여 레이저 효율을 저하시킨다.

수동 큐스위칭 레이저 공진기에서 포화흡수체에 의한 공진기의 광학적 손실은 공진기 내부에서 생성되는 레이저광 강도에 의존하는 특성을 지닌다. 포화흡수체는 공진기에서 초기 내부 광손실이 레이저 매질의 여기된 반전밀도에 의한 이득보다 클 때까지 레이저 발진을 지연시키는 광학적 개폐장치 역할을 한다. 공진기에서 큐스위칭 열림동작이 일어나기 전, 광펌핑으로 레이저매질의 밀도반전이 형성되는 것과 더불어 여기된 레

이저매질로부터 형광과 증폭 자발방출(amplified spontaneous emission)이 발생한다.^[25,26] 이들 방출광이 포화흡수체에 흡수되어 초기투과도를 변화시키고 공진기의 광손실과 레이저매질의 이득 상태를 변화시킨다. 큐스위칭 열림동작 시작 시점에 나타나는 포화흡수체의 투과도는 초기 광흡수 효과로 초기투과도보다 높은 포화투과도를 보인다. 즉, 수동 큐스위칭 공진기의 낮은 Q-상태에서 형광, 증폭 자발방출광이 포화흡수체에 흡수되어 공진기의 초기 광손실을 감소시킨다. 이 때, 형성된 밀도반전수는 공진기의 광손실 감소로 이론적 초기 반전밀도수보다 낮게 형성되고 출력에너지도 기존 수동 큐스위칭 이론값보다 작게 나타난다.

기존 수동 큐스위칭 레이저 출력특성 연구에서는 높은 Q-상태에서 나타나는 포화흡수체의 여기상태 흡수와^[4,12,20-21] 기저상태 불포화 현상이^[1,2] 주로 논의되었다. 또, 큐스위칭 전에 발생하는 레이저매질의 형광강도를 측정하여 능동 큐스위칭 열림시간을 조정하므로 레이저의 침투출력 안정화를 향상시키는 시도가 이루어졌다.^[25] 그러나, 레이저 매질의 초기 밀도반전이 형성되는 과정에서 포화흡수체의 초기 광흡수에 의한 공진기의 광손실과 이득 관계가 아직 구체적으로 연구된 바 없는 상태이다. 본 연구에서는 수동 큐스위칭 열림동작 이전의 낮은 Q-상태에서 나타나는 광흡수 효과로 인한 포화흡수체의 투과도 변화와 그에 따른 공진기의 광손실과 레이저 매질의 초기 반전밀도수를 구하여 출력에너지 특성의 이론값과 실험값을 비교 분석하였다. 초기투과도 0.48과 0.38인 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG를 사용한 1.06 μm 수동 큐스위칭 Nd:YAG 공진기의 큐스위칭 열림동작 시점에서 나타난 레이저매질의 반전밀도수와 Cr⁴⁺:YAG의 투과도를 구하였다. 정상모드와 수동 큐스

[†]E-mail: youngs26@add.re.kr

위칭 모드는 공진기 내부에서 포화흡수체를 제외하면 같은 펌핑 조건을 가진다. 따라서, 정상상태에서 주어지는 펌핑 문턱 에너지와 문턱 반전밀도수의 관계를 이용하여 전기적 인가 펌핑에너지와 레이저매질 Nd:YAG의 펌핑된 반전밀도수를 구하였다. 또, 수동 큐스위칭 공진기의 낮은 Q-상태에서 나타나는 포화흡수체의 광흡수 효과와 더불어 큐스위칭 레이저 발생을 위해 형성된 밀도반전 상태와 출력에너지를 이론적으로 비교 분석하였다.

II. 이 론

포화흡수체의 포화특성을 고려한 수동 큐스위칭 공진기의 평균 광자밀도(photon density) ϕ 에 대한 율방정식은 식 (1)과 같이 주어진다.^[4,12,20-22]

$$\frac{d\phi}{dt} = \phi \left[2\sigma n l - 2\sigma_{gs} n_{s1} l_s - 2\sigma_{es} n_{s2} l_s - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - L \right] \quad (1)$$

이 때, t_r 은 공진기내 광자 왕복 진행시간, σ 는 레이저매질의 유도방출 단면적, n 은 순간 반전밀도, l 은 레이저매질의 길이, R 은 출력경 반사율, L 은 정상모드 공진기의 내부 광손실, l_s 는 포화흡수체의 두께이다. σ_{gs} 와 σ_{es} 는 포화흡수체의 기저상태 및 여기상태 흡수단면적이다. n_{s1} 과 n_{s2} 는 포화흡수체의 기저상태와 여기상태 이온 밀도수이고 총밀도수 $n_{so} = n_{s1} + n_{s2}$ 는 기저상태와 여기상태 밀도수의 합이고, l_s 는 포화흡수체의 두께이다. 포화흡수체에 입사되는 에너지밀도가 매우 작을 때, 기저상태 이온 밀도수는 $n_{s1} = n_{so}$ 이므로 포화흡수체의 초기투과도는 $T_o = \exp(-\sigma_{gs} n_{so} l_s)$ 과 같다. 또, 충분히 큰 입사 에너지밀도에서는 여기상태 이온 밀도수가 $n_{s2} = n_{so}$ 이므로 포화흡수체의 최대 포화투과도는 $T_{max} = \exp(-\sigma_{es} n_{so} l_s)$ 와 같이 주어진다.

포화흡수체를 사용하지 않은 정상모드(free runing) 공진기에서 나타난 출력경 반사율과 문턱에너지의 관계는 식 (2)와 같이 주어진다.^[26]

$$\ln\left(\frac{1}{R}\right) = 2kE_{in} - L \quad (2)$$

이 때 k 는 공진기의 펌핑상수이고 L 은 정상모드 공진기의 내부 광손실이다. 같은 출력경 반사율을 지닌 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기에서 포화흡수체에 의한 내부 광손실 조건은 다르지만, 같은 펌핑율을 가지므로 같은 펌핑 인가에너지에서 형성되는 레이저매질의 반전밀도수는 동일하다고 할 수 있다.^[27] 또, 펌핑에너지에 비례하여 밀도반전이 형성된다. 정상모드에서 주어지는 문턱 반전밀도 n_{th} 는 식 (3)와 같이 정의된다. 따라서, 4준위 Nd:YAG 레이저매질에서 수동 큐스위칭 레이저 발생을 위한 인가 펌핑에너지 E_m 에 대한 레이저매질의 펌핑된 반전밀도수 n_{pi} 의 비는 정상모드의 문턱 펌핑에너지 E_{th} 에 대한 문턱 반전밀도수 n_{th} 의 비와 같으므로 식 (4)와 같이 표현 될 수 있다.

$$n_{th} = \frac{1}{2\sigma l} \left[\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \quad (3)$$

$$\frac{E_{in}}{E_{th}} = \frac{n_{pi}}{n_{th}} \quad (4)$$

초기반전밀도는 Q-스위칭 열림동작 전에 광펌핑에 의한 레이저매질의 이득과 공진기의 손실이 같을 때 주어진다. 이론적으로 볼 때, 포화흡수체의 기저상태 이온 밀도수가 $n_{s1} = n_{so}$ 인 초기투과도인 상태에서 식 (1)이 0일 때 초기 반전밀도수 n_i 는 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} n_i &= \frac{1}{2\sigma l} \left[2\sigma_{gs} n_{so} l_s + \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \\ &= \frac{1}{2\sigma l} \left[\ln\left(\frac{1}{T_o^2}\right) + \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \end{aligned} \quad (5)$$

수동 큐스위칭 레이저 펄스의 발생은 광펌핑으로 형성된 초기 반전밀도수에 의한 레이저매질의 이득이 반사경의 반사율, 정상모드 공진기의 자체 내부 광손실 그리고 포화흡수체의 초기투과도에 의한 광손실의 합보다 클 때 일어난다. 수동 큐스위칭 레이저 공진기의 낮은 Q-상태에서 광펌핑으로 밀도반전이 이루어지는 동안에 포화흡수체는 초기투과도에 의한 높은 광손실로 레이저 발진을 억제함과 동시에 초기 광흡수 효과가 일어난다. 포화흡수체의 초기 광흡수는 여기된 레이저매질의 형광과 증폭 자발방출광에 의해 일어난다. 낮은 Q-상태인 공진기에서 포화흡수체의 기저상태에 있는 흡수이온중 일부가 광흡수 효과로 여기상태로 여기된다. 따라서, 큐스위칭 열림동작 시점에서는 포화흡수체의 초기투과도가 증가하게 된다. 이는 수동 큐스위칭 공진기의 초기 광손실 감소를 초래하며, 수동 큐스위칭 레이저 발생을 위해 형성된 펌핑 밀도반전수 n_i' 는 식 (6)과 같이 표현 될 수 있다.

$$n_i' = \frac{1}{2\sigma l} \left[2\sigma_{gs} n_{s1} l_s + 2\sigma_{es} n_{s2} l_s + \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \quad (6)$$

이 때 T_{oi} 는 수동 큐스위칭 열림동작 시점에서의 포화흡수체의 포화투과도이다. 포화흡수체에 의한 초기 광흡수 효과를 고려할 때, 수동형 큐스위칭 레이저 발생을 위해 형성된 식 (6)의 펌핑된 밀도반전수 n_i' 는 식 (5)에 의한 초기 반전밀도수 n_i 보다 작게 이루어진다. 식 (6)의 펌핑된 밀도반전수는 수동 큐스위칭 레이저 발생을 위해 형성된 최소 반전밀도수이다. 최소 펌핑에너지에 의해 형성된 최소 반전밀도수 $n_i' = n_{pi}'$ 를 식 (4)를 통해 구한 후, 식 (6)에 대입하므로 수동 큐스위칭 열림동작 시점에서의 포화투과도 T_{oi} 를 구할 수 있다.

최대 광자밀도가 발생하는 높은 Q-상태 공진기에서 포화흡수체의 포화투과도는 기저상태의 불포화로 최대투과도보다 낮게 나타난다. 따라서 수동형 큐스위칭 공진기에서 주어지는 문턱 반전밀도수는 식 (7)과 같이 주어진다.^[1,2]

$$n_i = \frac{1}{2\sigma l} \left[\ln\left(\frac{1}{T_o^2}\right) + \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \quad (7)$$

이 때 T_o 는 최대 광자 밀도가 발생하는 수동 큐스위칭 펄스 강도의 최대치에서 나타나는 포화흡수체의 포화투과도이다.

수동 큐스위칭 펄스가 종료되는 시점에서의 최종 반전밀도 수 n_f 는 펌핑된 최소 초기 반전밀도수와 문턱 반전밀도수에 의한 초월함수 관계로 식 (8)과 같이 주어진다.^[14]

$$n_f = n_i' - n_t \ln\left(\frac{n_i'}{n_f}\right) \quad (8)$$

큐스위칭 펄스 발생으로 펌핑된 반전밀도수가 문턱 반전밀도수 이하로 감소하여 최종 반전밀도수가 된다. 포화흡수체의 흡수이온은 여기상태에서 기저상태로 완화(relaxation)되어 투과도 손실이 증가하므로 공진기의 손실은 최대가 된다. 이 때, 광자밀도는 0이 된다. 광자밀도 증가에 따른 포화흡수체의 투과도 변화는 공진기 광손실의 시간적 변화를 의미한다. 수동 큐스위칭 열림동작 이전에 나타나는 초기 광흡수 효과에 의한 공진기 손실과 밀도반전 상태를 고려한 수동 큐스위칭 레이저 출력에너지는 식 (9)와 같이 나타난다.^[14]

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i'}{n_f}\right) \quad (9)$$

이때 $h\nu$ 는 레이저 파장의 광자에너지, A 는 레이저 매질의 단면적, γ 는 밀도반전 감소계수로 1.06 μm Nd:YAG 레이저의 경우 0.6이다.

III. 실험 및 결과분석

포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG를 이용한 수동형 큐스위칭 Nd:YAG 공진기를 그림 1과 같이 구성하여 전기적 인가에너지 증가에 따른 레이저 출력에너지를 pyroelectric 에너지미터(Moletron, J50, JD-2000)로 측정하였다. 또 큐스위칭 출력펄스의 개수를 Si 광검출기(Newport, 818-BB-20, 상승시간 200 ps 이하)와 오실로스코프(Tektronix, TDS 744A, 500 MHz)로 측정하였다. 사용된 평면 출력경의 반사율은 20%, 전반사경의 곡률반경은 10 m, Nd:YAG 레이저봉은 직경 4 mm, 길이 58 mm, 공진기 길이는 22 cm 그리고 최대 전기적 인가에너지는 10.5 J 이하로 제한하여 사용하였다. Nd:YAG 레이저매질의 유도방출 단면적은 $6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 이다. 그림 2는 펌핑광 발생을 위해 PFN (pulse forming network)으로부터 Xe 섬광관에 가해지는 방전 전류의 펄스모양과 이 때 발진된 정상모드 Nd:YAG 레이저의 펄스모양이다.

사용된 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG(Union Carbide)의 초기투과도 0.48과 0.38인 Cr:YAG의 길이는 각각 3.96 mm와 5.21 mm 이고 단결정의 양면은 파장 1.06 μm 에 대하여 무반사 코팅되었다. 파장 1.06 m에서 사용된 포화흡수체 Cr:YAG의 기저상태 흡수단면적은 약 $5.7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 이므로,^[9] 흡수계수는 약

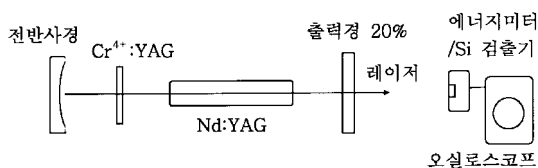


그림 1. 실험장치도.

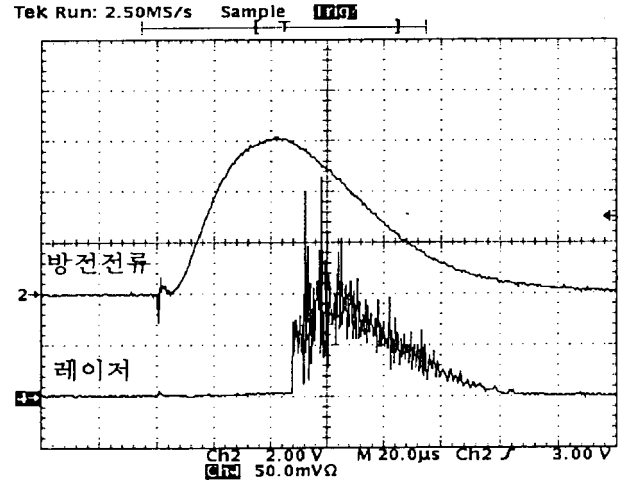


그림 2. 섬광관 방전전류 펄스와 정상모드 Nd:YAG 레이저의 펄스 파형.

1.85 cm^{-1} 이고, Cr⁴⁺ 이온의 도핑 이온 밀도수는 약 $3.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 또, 여기상태 흡수단면적은 $0.8 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 이다. $T_{\text{max}} = \exp(-\sigma_{\text{es}} n_{\text{so}} l_s)$ 로부터 구한 초기투과도 0.48인 Cr⁴⁺:YAG의 최대 포화투과도는 약 0.91이고, 초기투과도 0.38의 경우 최대 포화투과도가 약 0.88이다. Cr⁴⁺:YAG의 포화에너지밀도는 약 27 mJ/cm^2 이다.

그림 3은 전기적 인가 펌핑에너지에 따른 Nd:YAG 레이저의 정상모드 출력에너지와 펌핑된 반전밀도수를 나타낸 것이다. 출력경 반사율 변화에 대한 정상모드의 출력 문턱에너지를 측정된 결과로 구한 식 (2)는 $-\ln R = 0.5E_{\text{th}} - 0.4$ 로 주어졌다. 따라서, 포화흡수체가 없는 정상모드 공진기의 손실은 0.4이고 펌핑상수는 0.25 J^{-1} 이다. 출력경의 반사율 20%인 정상모드 Nd:YAG 공진기에서 나타난 문턱 펌핑에너지는 약 4

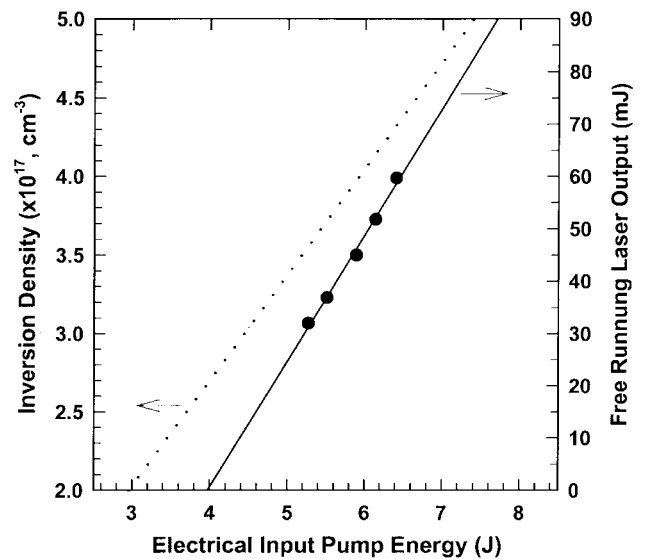


그림 3. 출력경 반사율 20%인 정상모드에서 전기적 펌핑에너지 증가에 따른 Nd:YAG 레이저의 출력에너지(●)와 반전밀도수(점선).

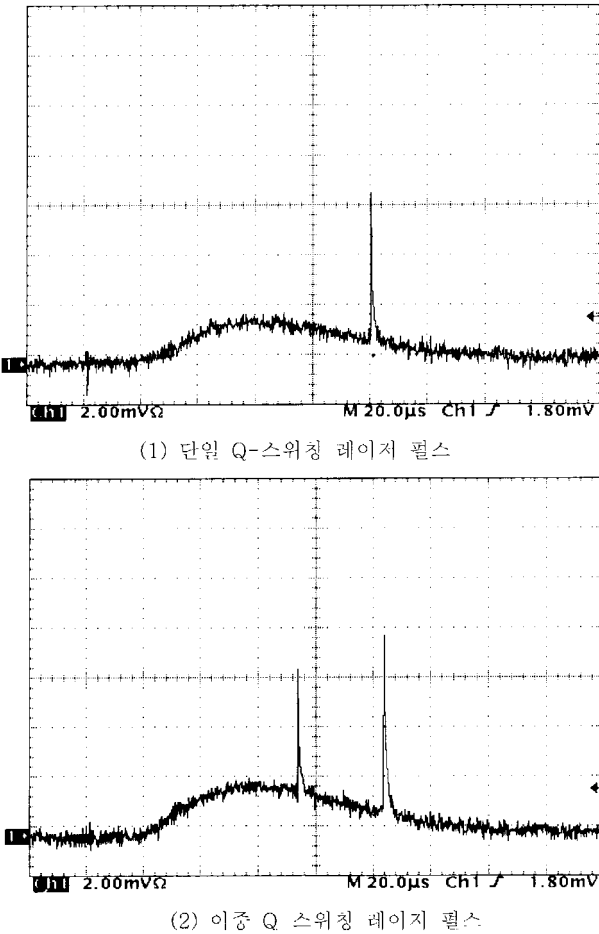


그림 4. 포화흡수체 Cr:YAG($T_0=0.48$)를 이용한 Nd:YAG 레이저의 단일 및 이중 Q-스위칭 레이저 펄스 모양.

± 0.1 J이다. 이 때, 식 (3)에 의한 문턱 반전밀도수는 약 $2.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 정상모드와 수동 큐스위칭 모드는 공진기 내부에서 포화흡수체를 제외하면 같은 펌핑 조건을 가지므로 같은 펌핑율을 가진다. 따라서 그림 3의 점선은 정상모드에서 나타난 전기적 인가 펌핑에너지 증가에 따른 Nd:YAG 레이저매질의 반전밀도수이다. 이는 같은 펌핑에너지에서 주어지는 수동 큐스위칭 모드에서의 펌핑된 반전밀도수와 같다. 레이저매질의 반전밀도수는 인가 펌핑에너지에 비례하여 형성된다.

그림 4는 초기투과도 0.38인 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG를 이용한 Nd:YAG 레이저 공진기에서 발진된 단일 및 이중 Q-스위칭 레이저 펄스의 시간적 특성을 측정된 것이다. 펌핑광 펄스 모양도 함께 측정된 것으로 최소 펌핑에너지에서 나타나는 단일 Q-스위칭 펄스는 펌핑광 펄스의 끝부분에서 발생한다. Q-스위칭 레이저 펄스발생은 광펌핑 중에 이루어진다. 이는 광펌핑에 의한 밀도반전이 완전히 이루어지지 않은 상태에서 공진기 손실과 이득조건이 같을 때 발진함을 의미한다. 단일펄스의 펄스폭은 17 ± 3 ns이다. 그림 5는 초기투과도 0.48과 0.38인 Cr⁴⁺:YAG를 사용하여 다중 큐스위칭된 펄스 레이저의 출력에너지 특성을 나타낸 것이다. 실선과 긴 막대선은 초기투과도 0.48과 0.38인 Cr⁴⁺:YAG를 사용한 큐스위칭 출력에너지와 펄

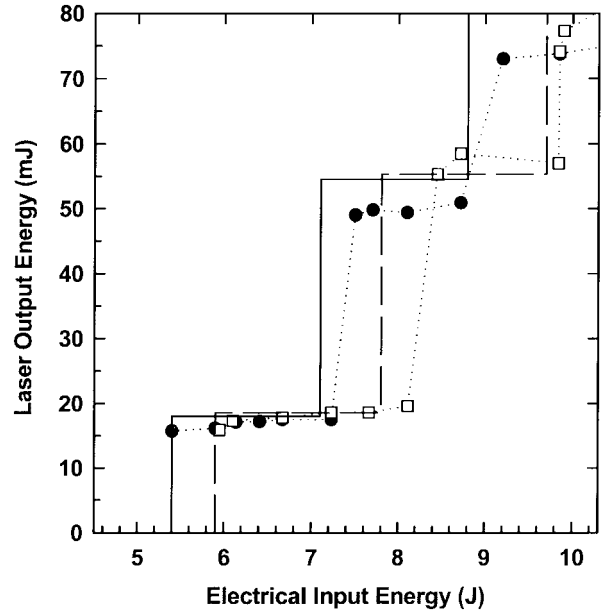


그림 5. 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG로 큐스위칭된 Nd:YAG 레이저의 출력특성에 대한 이론과 측정 결과 비교(●: 0.48, □: 0.38 초기투과도).

스발생 범위를 구한 이론적 결과이고 점선은 측정 결과이다. 전기적 인가 펌핑에너지 5.4~7.3 J과 5.9~8.3 J 범위에서 단일 수동 큐스위칭 레이저가 발생함을 보였다. 초기투과도 0.48과 0.38인 Cr⁴⁺:YAG를 사용한 수동 큐스위칭 공진기에서 단일 큐스위칭 레이저 펄스 발생을 위한 최소 펌핑에너지는 각각 5.4 ± 0.1 J과 5.9 ± 0.1 J이었다. 식 (4)를 이용하여 구한 최소 반전밀도수는 각각 3.6×10^{17} 과 $3.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 또, 펌핑 문턱에너지는 각각 4.5 ± 0.1 J과 4.9 ± 0.1 J이었다. 최소 반전밀도수를 식 (6)에 대입하여 얻은 큐스위칭 열림동작 시점에서 나타나는 Cr⁴⁺:YAG의 투과도는 각각 0.70 ± 0.02 과 0.62 ± 0.02 이다. 이는 형광 그리고 증폭 자발방출이 포화흡수체에 흡수되어 초기투과도 0.48과 0.38인 Cr⁴⁺:YAG의 투과도를 증가시킨 결과이다. 큐스위칭 열림동작 이전 광펌핑 동안에 초기 광흡수 효과로 두 Cr⁴⁺:YAG 고체소자의 기저상태 흡수이온 Cr⁴⁺의 밀도수는 약 $1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이고 기저상태에 대한 여기상태의 Cr⁴⁺ 이온밀도수의 비는 약 44%이다. 포화흡수체의 초기 광흡수 효과가 없을 경우 초기투과도에 의한 공진기의 광손실과 이득 관계를 나타낸 식 (5)에서 큐스위칭 레이저 발생을 위한 초기 반전밀도수는 각각 4.6×10^{17} 와 $5.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 낮은 Q-상태에서 광흡수 효과를 고려한 식 (4)의 최소 반전밀도수는 식 (5)에 의한 이론적 초기 반전밀도수보다 작게 나타났다. 단일 수동 큐스위칭 펄스 발생을 위한 최대 펌핑에너지는 각각 7.3 ± 0.1 J과 8.3 ± 0.1 J이고, 이 때 펌핑된 반전밀도수는 각각 4.9×10^{17} 와 $5.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 전기적 인가 펌핑에너지가 증가하여도 큐스위칭된 레이저의 출력에너지는 일정한 펌핑에너지 범위에서 동일한 출력특성을 지니고, 큐스위칭된 펄스들의 열림시간이 빨라졌다. 열림시간의 변화는 펌핑률 증가로 밀도반전 형성 시간이 빨라지기 때문이다. 그림 5에서 단일 수동 큐스위칭 펄스 발생을 위한 전기적

인가 펌핑에너지의 범위는 각각 1.9과 2.4 J이었다. 이는 수동 큐스위칭 레이저 발생이 펌핑된 반전밀도수에 비례하지 않는 특성을 보인 것이다.^[28] 이중 펄스를 발생하기 위해서는 첫 펄스의 발생으로 최종 반전밀도수로 감소한 후 다시 밀도반전수 n_i' 가 형성되어야 하므로 밀도반전수가 $2n_i' - n_f$ 보다 클 때 이중 펄스가 발생한다. 따라서, 펌핑에너지를 계속 증가시킬 경우, 일정 에너지 범위에서 같은 펄스 수와 출력에너지를 지닌 큐스위칭 레이저 펄스가 발생한다. 펄스 수의 증가와 함께 계단 형태의 출력에너지 증가를 보인다. 인가 펌핑에너지 7.4~8.9와 8.4~9.8 J 범위에서 이중 수동 큐스위칭 레이저 펄스가 발생하였다. 이 때, 두 번째 펄스 발생을 위한 밀도반전수는 $n_i' + n_f$ 로 그림 5에서 나타난 결과와 같이 첫 펄스보다 큰 출력에너지를 갖는다. 계속 증가된 인가 펌핑에너지에서는 삼중 펄스가 발생하였다. 이와 같은 다중 큐스위칭 펄스의 발생은 충분한 펌핑 조건하에서 밀도반전과 포화흡수체의 투과도 손실의 변화가 반복적으로 나타나기 때문이다.

전기적 인가 펌핑에너지 증가에 따른 계단 형태의 출력에너지 변화에서 큐스위칭 펄스 수가 증가하는 초기 펌핑에너지와 이 때 발생한 레이저 출력에너지와의 관계를 이용하여 구한 펌핑 문턱에너지는 각각 4.5 ± 0.1 와 4.9 ± 0.1 J이고 문턱 반전밀도수는 약 3.0×10^{17} 과 $3.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이다.^[1,2] 식 (7)에서 최대 광자밀도가 발생하는 높은 Q-상태에서 나타난 포화투과도 T_s 는 각각 0.88 ± 0.02 과 0.80 ± 0.02 로 최대투과도 T_{max} 보다 낮게 나타났다.^[14]

그림 6은 Frantz-Nodvik 방정식을 이용하여 파장 $1.06 \mu\text{m}$ 인가 에너지밀도 변화에 따른 초기투과도 0.48과 0.38인 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG의 비선형적 투과도 변화를 나타낸 것이다. Nd:YAG 레이저의 수동 큐스위칭 열림동작 시점에서 Cr⁴⁺:YAG의 투과도는 각각 0.70 ± 0.02 과 0.62 ± 0.02 이고 초기 광흡수 에너지 밀도는 두 경우 모두 약 0.85 J/cm^2 이다. 이는 밀도반전을 위해 광펌핑이 이루어지는 낮은 Q-상태에서 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG가 초기 광흡수 효과를 갖는다는 의미로 밀도반전 형성에 영향을 미친다. 최대 광자밀도가 발생하는 높은 Q-상태에서 나타난 Cr⁴⁺:YAG의 포화투과도는 각각 0.88 ± 0.02 과 0.80 ± 0.02 이고 광에너지 밀도는 각각 약 0.7과 0.3 J/cm^2 이다. 이는 공진기내에서 발생한 레이저의 평균강도가 포화흡수체를 완전히 포화시킬 수 있는 높은 강도이지만 시공간적 평균 레이저 강도의 변화 특성으로 Cr⁴⁺ 흡수이온이 완전하게 여기되지 못하고 기저상태에 남아 있기 때문이다.

식 (4)와 (7)에서 구한 최소 반전밀도수와 문턱 반전밀도수를 식 (8)에 대입하여 얻은 최종 반전밀도수는 각각 2.5×10^{17} 와 $2.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 측정된 단일 수동 큐스위칭 출력에너지는 17 ± 1 과 $18 \pm 1.5 \text{ mJ}$ 이다. 초기 광흡수 효과가 고려된 출

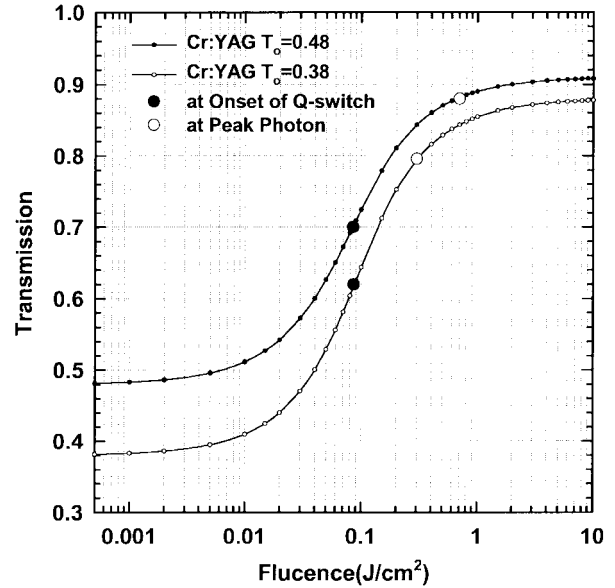


그림 6. 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG의 비선형적 투과 특성과 Nd:YAG 레이저의 큐스위칭 동작에서 나타난 Cr⁴⁺:YAG의 투과도.

력에너지의 수정 이론값은 각각 18과 18.5 mJ로 측정된 실험값과 잘 일치함을 보였다. 이 때, 양자 추출효율(Quantum extraction efficiency)은 두 경우 약 32%이다. 이중 펄스에서 두 번째 펄스에 의한 출력에너지의 이론적 계산값은 약 36.5와 36.8 mJ로 첫 펄스보다 큰 출력에너지를 보인다. 이는 첫 번째 펄스가 발생한 후 레이저 매질에 남아 있는 최종 반전밀도수에 의한 것으로 두 번째 펄스 발생에서 반전밀도수가 n_i' 대신에 $n_i' + n_f$ 가 되기 때문이다.

포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG를 사용한 큐스위칭 Nd:YAG 레이저 공진기에서 나타난 레이저 매질의 밀도반전과 포화흡수체의 투과도 특성은 표 1 그리고 표 2와 같다. 표 1은 Nd:YAG 레이저의 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 레이저 매질의 반전밀도 상태와 출력에너지 특성이다. 초기 광흡수 효과가 고려되지 않은 수동 큐스위칭 이론에서 주어지는 식 (5)의 초기 반전밀도수 n_i 는 각각 4.6×10^{17} 과 $5.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 로 표 1의 측정 결과보다 높은 값을 보인다. 또 식 (10)에서 초기 반전밀도수의 이론값을 이용하여 구한 단일 수동 큐스위칭 출력에너지는 각각 47.8과 59.2 mJ로 실제 측정값보다 약 3배 정도 높게 나타난다. 표 2는 Nd:YAG 레이저의 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 Cr⁴⁺:YAG의 투과도와 기저상태 흡수이온 밀도상태 특성이다. 결론적으로, 높은 Q-상태에서 나타나는 여기상태 흡수(excited state absorption),^[4,13,15] 기저상태의 불포화^[1,2]와 더불어 기존 이론에서 고려되지 않은 낮은 Q-상태에

표 1. Nd:YAG 레이저의 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 레이저 매질의 반전밀도 상태와 출력에너지 특성

초기 투과도	최소 초기 반전밀도수 ($\times 10^{17}, \text{cm}^{-3}$)	문턱반전 밀도수 ($\times 10^{17}, \text{cm}^{-3}$)	최종반전 밀도수 ($\times 10^{17}, \text{cm}^{-3}$)	수정이론 출력에너지 (mJ)	측정된 출력에너지 (mJ)	단일펄스 발생 범위 (J)
0.48	3.6	3.0	2.5	18.0	17 ± 1.0	5.4~7.3
0.38	3.9	3.3	2.7	18.5	18 ± 1.5	5.9~8.3

표 2. Nd:YAG 레이저의 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 Cr⁴⁺:YAG의 투과도와 기저상태 흡수이온 밀도 특성

초기 투과도 T_o	최대투과도 T_{max}	큐스위칭 열림동작 시점		최대 광자밀도 발생 시점	
		투과도 T_{oi} (오차:±0.02)	이온밀도수 n_{s1}' ($\times 10^{17}$, cm ⁻³)	포화투과도 T_s (오차:±0.02)	이온밀도수 n_{s1}'' ($\times 10^{17}$, cm ⁻³)
0.48	0.91	0.70	1.4	0.88	0.2
0.38	0.88	0.62	1.4	0.80	0.4

서 나타나는 포화흡수체의 초기 광흡수 효과가 수동 큐스위칭 레이저 출력특성에 큰 영향을 미친다. 낮은 Q-상태에서 발생하는 레이저매질의 형광과 자발 증폭방출광이 포화흡수체에 흡수되므로 포화흡수체에 의한 투과도 광손실이 감소하여 초기 공진기 손실이 낮아진 상태에서 Q-스위칭 레이저 발생을 위한 밀도반전 조건이 주어지기 때문이다. 이는 초기 광흡수 효과로 이득매질의 낮은 밀도반전 상태에서 Q-스위칭 레이저가 발생함을 의미한다.

IV. 결 론

일반적으로 수동 큐스위칭 레이저 출력특성은 포화흡수체의 포화투과 특성과 공진기의 펌핑조건에 의존한다. 즉, 수동 큐스위칭 레이저 공진기에서 광손실과 이득은 큐스위칭 동작시 나타나는 포화흡수체의 투과특성과 레이저매질의 밀도반전 상태에 의해 주로 결정된다. 광펌핑 동안에 펌핑광과 레이저매질의 형광과 증폭 자발방출광이 포화흡수체에 흡수되어 큐스위칭 열림동작 이전에 포화흡수체의 투과도를 증가시킨다. 이로 인하여 공진기의 초기 광손실이 감소할 뿐 아니라 펌핑된 반전밀도수도 초기 반전밀도수보다 낮게 나타난다. 따라서, 실질적 단일 수동 큐스위칭 레이저 출력에너지는 기존 수동 큐스위칭 이론값보다 매우 작게 발생한다. 본 연구에서는 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG 고체소자로 수동 큐스위칭된 Nd:YAG 레이저의 출력특성을 분석하기 위하여 낮은 Q-상태에서 광흡수 효과로 나타나는 큐스위칭 열림동작 시점에서의 Cr⁴⁺:YAG의 투과도, 펌핑된 Nd:YAG의 초기, 문턱과 최종 반전밀도수 그리고 출력에너지를 분석하였다. 초기투과도 0.48과 0.38인 Cr⁴⁺:YAG를 사용한 큐스위칭 레이저 공진기에서 최소 펌핑에너지는 각각 5.4와 5.9 J이고, 펌핑된 최소 반전밀도수는 각각 3.6×10^{17} 과 3.9×10^{17} cm⁻³이었다. 밀도반전을 위한 광펌핑 동안 발생한 형광, 증폭 자발방출 그리고 일부 펌핑광에 의한 초기 광흡수 효과로 큐스위칭 열림동작 시점에서의 두 Cr⁴⁺:YAG의 투과도는 각각 0.70 ± 0.01 과 0.62 ± 0.01 로 증가하였다. 이때, 두 Cr⁴⁺:YAG 고체소자의 기저상태 흡수이온 Cr⁴⁺의 밀도수는 약 1.4×10^{17} cm⁻³이고 기저상태에 대한 여기상태의 Cr⁴⁺ 이온밀도수의 비는 약 0.44이다. 또, 측정된 단일 수동 큐스위칭 레이저 출력에너지는 17 ± 1 과 18 ± 1.5 mJ로 초기 광흡수 효과가 고려된 최소 반전밀도수를 이용하여 계산한 단일 수동 큐스위칭 레이저 출력에너지와 잘 일치함을 보였다. 결론적으로, 낮은 Q-상태에서 나타나는 포화흡수체의 초기 광흡수 효과는 공진기의 광학적 손실 감소와 더불어 펌핑된 반전밀도수의 형성을 작게 하여 수동 큐스위칭 레이저의 출력에너지와 효율을 감소시킨다.

참고문헌

- [1] Y. S. Choi, "Saturation characteristics of Cr⁴⁺:YAG crystals and dye films for passive Q-switches," *Appl. Opt.* vol. 40, pp. 5417-5422, 2001.
- [2] 최영수, 전용근, 김재기, "포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG와 유기염료 박막의 포화특성 분석," *한국광학회지*, 제12권, pp. 98-102, 2001.
- [3] 정태문, 김광석, 문희중, 이종훈, 김철중, 이종민, "Cr⁴⁺:YAG 포화흡수체를 이 용한 레이저 다이오드 뒷면 여기 Nd:YAG 레이저의 들뜸 효율 및 Q-switching 특성 연구," *한국광학회지*, 제9권, pp. 231-235, 1998.
- [4] A. Agnesi, S. Dell'Acqua, C. Morello, G. Piccinno, G. C. Reali, and Z. Sun, "Diode-pumped Neodymium lasers repetitively Q-switched by Cr⁴⁺:YAG solid-state saturable absorbers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 3, pp. 45-52, 1997.
- [5] Y. Shimony, Z. Burshtein, and Y. Kalisky, "Cr⁴⁺:YAG as passive Q-switch and brewster plate in a pulsed Nd:YAG laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, 31, pp. 1738-1741, 1995.
- [6] P. Yankov, "Cr⁴⁺:YAG Q-switching of Nd:host laser oscillators," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 27, pp. 1118-1120, 1994.
- [7] Y. Shimony, Z. Burshtein, A. B. Baranga, Y. Kalisky, and M. Strauss, "Repetitive Q-switching of a cw Nd:YAG laser using Cr⁴⁺:YAG saturable absorbers," *IEEE J. Quantum Electron.*, 32, pp. 305-310, 1996.
- [8] Y. Shimony, Y. Kalisky, and B. Chai, "Quantitative studies of Cr⁴⁺:YAG as a saturable absorber for Nd:YAG laser," *Opt. Mater.*, 4, pp. 547-551, 1995.
- [9] J. Dong, P. Deng, Y. Liu, Y. Zhang, J. Xu, W. Chen, and X. Xie, "Passive Q-switched Yb:YAG laser with Cr⁴⁺:YAG as the saturable absorber," *Appl. Opt.*, 40, pp. 4303-4307, 2001.
- [10] Y. F. Chen and S. W. Tsai, "Simultaneous Q-switching and mode-locking in a diode-pumped Nd:YVO₄-Cr⁴⁺:YAG laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, 37, pp. 580-586, 2001.
- [11] Y. Bai, N. Wu, J. Zhang, J. Li, S. Li, J. Xu, and P. Deng, "Passively Q-switched Nd:YVO₄ laser with a Cr⁴⁺:YAG crystal saturable absorber," *Appl. Opt.*, 36, pp. 2468-2472, 1997.
- [12] G. Xiao and M. Bass, "Additional experimental confirmation of the predictions of a model to optimize passively Q-switched lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, 34, pp. 1142-1143, 1998.
- [13] G. Xiao and M. Bass, "A generalized model for passively Q-switched lasers including excited state absorption in the saturable absorber," *IEEE J. Quantum Electron.*, 33, pp. 41-44, 1997.
- [14] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 5th ed. (Springer-

- Verlag, Berlin, 1999), Chap. 8.
- [15] Z. Burshtein, P. Blau, Y. Kalisky, Y. Shimony, and M. R. Kokta, "Excited-state absorption studies of Cr^{4+} ions several garnet host crystals," *IEEE J. Quantum Electron.*, 34, pp. 292-299, 1998.
- [16] G. Xiao, J. H. Lim, S. Yang, E. V. Stryland, M. Bass, and L. Weichman, "Z-scan measurement of the ground and excited state absorption cross sections of in yttrium aluminum garnet," *IEEE J. Quantum Electron.*, 35, pp. 1086-1091, 1999.
- [17] H. Eilers, K. R. Hoffman, W. M. Dennis, S. M. Jacobsen, and W. M. Yen, "Saturation of 1.064 μm absorption in $\text{Cr,Ca:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ crystals," *Appl. Phys. Lett.*, 61, pp. 2958-2960, 1992.
- [18] 고해석, 전용근, " Cr^{4+} :YAG 결정과 유기염료 박막의 포화흡수 특성에 관한 연구," *새물리*, 제39권, pp. 113-117, 1999.
- [19] Y. Kalisky, A. B. Barabga, Y. Shimony, Z. Burshtein, S. A. Pollack, and M. R. Kokta, " Cr^{4+} doped garnets: their properties as non-linear absorbers," *Opt. Mater.*, 6, pp. 275-280, 1996.
- [20] X. Zhang, S. Zhao, Q. Wang, Q. Zhang, L. Sun, and S. Zhang, "Optimization of Cr^{4+} -doped saturable absorber Q-switched lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, 33, pp. 2286-2294, 1997.
- [21] John J. Degnan, "Optimization of passively Q-switched lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, 31, pp. 1890-1901, 1995.
- [22] Y. F. Chen, Y. P. Lan, and H. L. Chang, "Simultaneous mode locking in a diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO₄ laser with a GaAs saturable absorber," *IEEE J. Quantum Electron.*, 37, pp. 462-468, 2001.
- [23] F. D. Patel and R. J. Bleach, "New formalism for the analysis of passively Q-switched laser systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, 37, pp. 707-715, 2001.
- [24] J. Liu and D. Kim, "Optimization of intracavity doubled passively Q-switched solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, 35, pp. 1724-1730, 1999.
- [25] W. Xie, Y. L. Lam, Y. C. Chan, S. C. Tam, J. Gu, F. Zhou, H. Yang, and G. Zhao, "Fluorescence feedback control of an active Q-switched diode-pumped Nd:YVO₄ laser," *Appl. Opt.*, 39, pp. 978-981, 2000.
- [26] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 5th ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1999), pp. 103-110, Chap. 3.
- [27] O. Svelto, *Principles of Lasers*, 4th ed. (Plenum Press, New York, 1998), Chap. 8.
- [28] X. Zhang, S. Zhao, Q. Wang, B. Ozygus, and H. Weber, "Modeling of diode-pumped actively Q-switched lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, 35, pp. 1912-1918, 1999.

The characteristics of the passively Q-switched Nd:YAG laser output energy with the initial absorbing effect of Cr^{4+} :YAG absorber

Young Soo Choi[†], Joo Hong Yoon, and Ki Hong Kim

Agency for Defense Development, Taejon 305-600, KOREA

[†]E-mail: youngs26@add.re.kr

(Received March 14, 2002 ; revised manuscript received June 13, 2002)

To understand the characteristics of the passively Q-switched Nd:YAG laser output energy with Cr^{4+} :YAG saturable absorbers, the transmissions of Cr^{4+} :YAG and the inversion population densities of Nd:YAG at the onset of Q-switch were experimentally analysed. The measured transmissions at the onset of Q-switch were 0.70 ± 0.02 and 0.62 ± 0.02 for the 0.48 and 0.38 of initial transmission, respectively. It means that the initial transmission loss of Cr^{4+} :YAG absorber is reduced in a low Q-state due to the initial absorbing effect of Cr^{4+} :YAG. In pumping stage, Cr^{4+} :YAG has absorbing processes due to the fluorescence and amplified spontaneous emissions of the Nd:YAG even if there is no laser oscillation. The minimum population inversion densities for Q-switch were approximately 3.7×10^{17} and $4.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, respectively. At the beginning of Q-switch, the number density of Cr^{4+} ions in the ground state of Cr^{4+} :YAG was approximately $1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and the ratio of the ground to the excited state of absorbing Cr^{4+} ions was 0.44 both. The modified theoretical output energies with the initial absorbing effect were 18 and 18.5 mJ. The measured output energies were 17 ± 1 and 18 ± 1.5 mJ, respectively. The quantum extraction efficiencies of Q-switch were 0.32 both. The theoretical Q-switched output results with the initial absorbing effect of the saturable absorber are a good agreement with the experimental results.

Classification code : LO.080.