

포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG와 유기염료 박막의 포화특성 분석

최영수[†] · 전용근 · 김재기

국방과학연구소 기술연구본부

Ⓣ 305-600 대전광역시 유성구 수남동 사서함 35-5호

(2000년 12월 26일 받음, 2001년 4월 10일 수정본 받음)

포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG와 유기염료 박막을 사용한 1.06 μm Nd:YAG 공진기에서 수동 큐스위칭 동작시 나타나는 포화흡수체의 포화특성을 분석하였다. 정상모드와 수동 큐스위칭 레이저의 문턱에너지 차이로 광손실을 측정하여 큐스위칭 동작에서 나타나는 포화흡수체의 포화투과도와 불포화 기저상태 밀도수를 분석하였다.

분류코드 : LO.080.

I. 서 론

종래의 유기염료 박막과 더불어, 파장 1 μm 영역에서 포화 흡수가 일어나는 고체 포화흡수체인 Cr⁴⁺:YAG 단결정^[1-4] 혹은 F₂:LiF 색중심 결정^[5]을 Nd 이온이 도핑된 레이저 매질의 수동 큐스위칭 소자로 최근 활용하고 있다. 특히 Cr⁴⁺:YAG 단결정은 1.4-1.6 μm 파장가변 레이저 매질로 사용이 가능하여 광학적 특성에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^[6,7] 일반적으로 포화흡수체의 기저상태 불포화와 여기상태 흡수는 수동 큐스위칭 과정에서 공진기의 내부 광손실로 작용한다. 효율적이고 소형 경량화된 Nd:YAG 레이저는 라만레이저와 parametric oscillator의 펌핑원으로 활용하므로 대기투과성과 시가보호가 우수한 1.5 μm 영역의 휴대용 레이저거리측정기 개발에 응용될 수 있다. Kodak 회사가 수동 큐스위칭 소자인 포화흡수체 유기염료박막의 생산을 중단하므로 새로운 수동 큐스위칭 소자로 Cr⁴⁺:YAG와 F₂:LiF 등에 대한 포화특성 연구가 많이 이루어졌다.^[8-10] 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG는 결정성장 과정에서 Cr³⁺와 Cr⁴⁺ 이온을 YAG 모체에 함께 지녀, Cr³⁺이온에 의한 이중 포논 흡수(two phonon absorption)와 Cr⁴⁺ 이온의 여기흡수로 완전한 포화가 일어나지 않는다. 일반적으로 Cr⁴⁺:YAG의 포화에너지밀도는 약 30 mJ/cm²이고 유기염료 박막의 포화에너지밀도는 약 0.3 mJ/cm²이다. 수동형 큐스위칭 레이저 공진기에서 효율적 단일 큐스위칭 출력에너지를 얻기 위해서는 유도방출 단면적이 큰 레이저 매질과 더불어 출력경 반사율과 포화흡수체 포화투과 특성의 선택이 중요하다.^[11-13] 레이저 매질의 유도방출 단면적보다 포화흡수체의 기저상태 흡수단면적이 클수록, 수동형 큐스위칭의 동작과정이 능동형과 가까워져, 출력에너지는 커지고 펄스폭은 짧아져 높은 첨두출력을 얻을 수 있다. 또 레이저 매질의 충분한 밀도반전과 동시에 포화흡수체의 광자흡수에 의한 완전한 포화가 즉시 일어나야 한다. 그러나, 포화흡수체의 포논에 의한 광자 흡수로

레이저매질의 밀도반전이 감소된다. 포화흡수체에 의한 광손실은 주로 기저상태 밀도의 불포화와 여기상태 흡수에 기인한다.

포화흡수체의 포화특성을 이해하기 위해, 기존의 방법으로는 레이저빔을 포화흡수체에 직접 조사하여 인가에너지에 따른 흡수체의 투과도 변화 관계를 측정하므로 초기투과도, 최대 포화투과도 그리고 포화흡수체의 포화에너지 밀도를 분석하였다.^[1,2,6,9,10] 또 포화흡수체의 기저상태와 여기상태 흡수단면적에 대한 다양한 분석이 이루어지고 있다.^[14] 본 연구에서는 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기의 문턱에너지 차이를 측정하여 포화흡수체에 의한 광손실을 구하므로써 수동 큐스위칭 레이저 동작과정에서 나타나는 Cr⁴⁺:YAG와 유기염료 박막의 포화투과도를 측정하였다. 또 포화투과도와 최대 포화투과도의 관계식을 이용하여 수동 큐스위칭 동작시에 주어지는 불포화 흡수 기저상태 밀도수와 여기흡수를 분석하였다.

II. 이 론

포화흡수체의 에너지 준위 모델은 그림 1과 같다.^[11,12] σ_{gs}, σ_{es}는 각각 기저상태 및 여기상태 흡수단면적으로 1과 3, 2와 4 에너지 준위사이에서 나타나는 레이저 발진 파장에 대한 흡수를 의미한다. 이 때, τ₂₁, τ₃₂, τ₄₂는 각각 2, 3과 4 에너지 준위의 수명이며, 유기염료 박막의 경우 τ₃₂ ≪ τ₂₁, τ₄₂ ≪ τ₂₁이고 τ₂₁의 수명은 약 5.7 ns로 큐스위칭된 레이저의 펄스 폭과 비슷하다.^[11] Cr:YAG의 경우, τ₂₁의 형광수명은 약 3.2-4 μs로 큐스위칭 레이저 펄스폭에 비하여 매우 길지만, τ₄₂와 τ₃₂의 수명이 매우 짧아 이온들이 바닥상태 1준위와 여기상태 2준위에만 있다고 가정할 수 있다.^[12] 포화흡수체에 입사되는 에너지밀도가 매우 작을 때 n_{s1}=n_{so}이므로 포화흡수체의 초기투과도는 식 (1)과 같고, 충분히 큰 입사 에너지밀도에서는 n_{s2}=n_{so}이므로 포화흡수체의 최대 포화투과도 T_{max}는 식 (2)와 같이 주어진다. 여기서 n_{s1}과 n_{s2}는 포화흡수체의 기저상태와 여기상태 흡수이온 밀도수이고 총밀도수 n_{so}=n_{s1}+n_{s2}는 기저상태와 여기상태 밀도수의 합이고, I_s는 포화흡수체의 두께이다.

[†]E-mail: youngs26@sunam.kreonet.re.kr

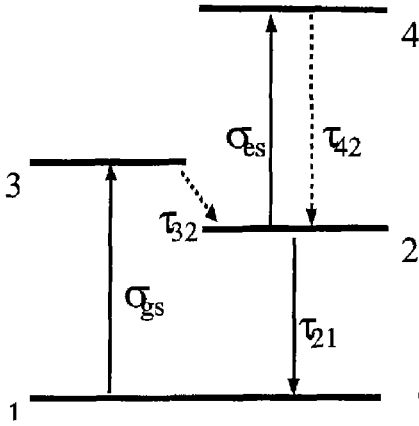


그림 1. 포화흡수체의 에너지준위 모델.

$$2 \sigma_{gs} n_{s0} l_s = \ln\left(\frac{1}{T_o^2}\right) \quad (1)$$

$$2 \sigma_{es} n_{s0} l_s = \ln\left(\frac{1}{T_{max}^2}\right) \quad (2)$$

$$\delta = \frac{\ln(T_{max})}{\ln(T_o)} = \frac{\sigma_{es}}{\sigma_{gs}} \quad (3)$$

식 (3)의 δ 는 포화흡수체의 기저상태 흡수에 대한 여기상태 흡수의 상대적 비를 의미한다.^[12,13] 여기상태 흡수가 없는 이상적인 포화흡수체일 때, δ 는 0이 된다. 수동 큐스위칭 레이저 동작시 나타나는 포화흡수체의 포화투과도 T_s 는 공진기의 펌핑조건과 포화흡수체의 optical density에 의존하며, 포화흡수체의 포화특성을 포함한 공진기의 광자밀도에 대한 율방정식은 식 (4)와 같이 표현된다. 이 때, 포화흡수체의 기저상태와 여기상태 흡수로 인한 포화투과도는 식 (5)과 같다.^[12] 이 때 t_r 은 공진기내 광자 왕복 진행시간, σ 는 레이저매질의 유도방출 단면적, n 은 반전밀도, l 은 레이저매질의 길이, R 은 출력경 반사율, L 과 L_{PQ} 는 각각 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기의 내부 광손실, l_s 는 포화흡수체의 두께이다.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[2\sigma n l - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - L_{PQ} \right] \quad (4)$$

$$= \frac{\phi}{t_r} \left[2\sigma n l - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - \ln\left(\frac{1}{T_s^2}\right) - L \right]$$

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

$$= \frac{\phi}{t_r} \left[2\sigma n l - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - 2(\sigma_{gs} - \sigma_{es}) n_{s1} l_s + \ln\left(\frac{1}{T_{max}^2}\right) - L \right]$$

$$\ln\left(\frac{1}{T_s^2}\right) = 2(\sigma_{gs} - \sigma_{es}) n_{s1} l_s + \ln\left(\frac{1}{T_{max}^2}\right) \quad (5)$$

포화흡수체를 사용하지 않은 정상모드(free runing) 공진기에서 나타난 출력경 반사율과 문턱에너지의 관계는 식 (6)와 같다. 또, 수동형 큐스위칭 공진기의 경우, 펌핑조건은 정상모드

와 같으나 포화흡수체에 의한 내부 광손실 조건이 다르므로 출력경 반사율과 문턱에너지의 관계는 식 (7)와 같이 표현될 수 있다. 이 때 k 는 공진기의 펌핑상수, E_{th} 와 E_{th}' 는 각각 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기의 문턱에너지를 의미한다.^[4,11,15]

$$-\ln R = 2k E_{th} - L \quad (6)$$

$$-\ln R = 2k E_{th}' - L_{PQ} \quad (7)$$

같은 출력경 반사율을 지닌 공진기에서, 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기의 문턱에너지의 차이 $\Delta E_{th} = E_{th}' - E_{th}$ 와 광손실의 차이 $\Delta L = L_{PQ} - L$ 은 포화흡수체의 포화흡수에 의한 것이다. 이 때 공진기의 펌핑상수 k 는 같은 펌핑조건이므로 동일하다. 식 (8)과 (9)의 n_{th} 와 n_{th}' 는 정상모드와 수동 큐스위칭 공진기에서 레이저매질의 문턱반전밀도로 두 반전밀도의 차이는 식 (10)과 같다. Nd:YAG 레이저는 4준위 레이저로 펌핑 인가에너지에 대한 소신호 이득(small signal gain)은 $kE_{th} = g_l$ 이다. 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기의 광손실차와 문턱 인가에너지 차이 ΔE_{th} 는 식 (11)과 같이 표현된다. 이 때 g_o 와 g_o' 는 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기에서 주어지는 문턱 인가에너지에 대한 소신호 이득이다. 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기의 광학적 손실차는 수동 큐스위칭 레이저 발진 과정에서 주어지는 포화흡수체의 포화흡수에 의한 것으로 식 (12)와 같다.^[11,14,15]

$$n_{th} = \frac{1}{2\sigma l} \left(\ln\frac{1}{R} + L \right) \quad (8)$$

$$n_{th}' = \frac{1}{2\sigma l} \left(\ln\frac{1}{R} + \ln\frac{1}{T_s^2} + L \right) \quad (9)$$

$$n_{th}' - n_{th} = \frac{1}{2\sigma l} \left(\ln\frac{1}{T_s^2} \right) \quad (10)$$

$$\Delta L = 2k\Delta E_{th} = 2(g_o' - g_o)l = 2\sigma l(n_{th}' - n_{th}) \quad (11)$$

$$2k\Delta E_{th} = \ln\left(\frac{1}{T_s^2}\right) \quad (12)$$

정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기의 인가문턱에너지 차이를 이용하여 광손실차를 구하므로 수동형 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 포화흡수체의 포화투과도와 불포화 기저상태 밀도수와 여기흡수를 구할 수 있다.

III. 실험 및 결과분석

포화흡수체를 이용한 수동형 큐스위칭 Nd:YAG 공진기를 구성하여 전기적 인가에너지 증가에 따른 레이저 출력에너지를 pyroelectric 에너지미터(Molelectron, 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. 이 때 사용된 출력경은 평면경, 전반사경의 곡률반경은 10 m, 레이저봉은 직경 4 mm, 길이 58 mm, 공진기 길이는 22 cm 그리고 최대 전기적 인가에

너지는 10.5 J 이하로 제한하여 사용하였다. 출력경 반사율 20, 30, 40, 65, 85%에 대한 정상모드의 문턱출력에너지를 측정한 결과, 식 (6)은 $-ln R=0.50 E_{th}-0.4$ 로 주어졌다. 따라서 포화흡수체가 없는 정상모드 공진기의 손실은 0.4이고 펌핑상수는 $0.25 J^{-1}$ 이다.

사용된 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG(Union Carbide)의 초기투과도 0.48(O.D=0.28)과 0.38(O.D=0.39)인 Cr:YAG의 길이는 각각 3.96 mm와 5.21 mm이고 단결정의 양면은 파장 1.06 μm에 대하여 무반사 코팅되었다. 파장 1.06 μm에서 사용된 포화흡수체 Cr:YAG의 기저상태 흡수단면적은 약 $5.7 \times 10^{-18} cm^2$ 이므로,^[9] 흡수계수는 약 $1.85 cm^{-1}$ 이고, Cr⁴⁺ 이온의 도핑 이온 밀도수는 약 $3.2 \times 10^{17} cm^{-3}$ 이다. 또, 여기상태 흡수단면적은 $0.8 \times 10^{-18} cm^2$ 이므로 δ는 약 0.14이다. 식 (2)로부터 얻은 Cr⁴⁺:YAG의 최대 포화투과도는 초기투과도 0.48(O.D=0.28)에서 약 0.91이고, 초기투과도 0.38(O.D=0.39)에서 약 0.88이다. 사용된 포화흡수체 유기염료 박막(Kodak, No 15064, Bis 4-dimethylaminobenzil(nikel))은 acetate sheet로 파장 1.06 μm에 대한 분자소멸계수는 $\epsilon=2.5 \times 10^4 l mol^{-1} cm^{-1}$ 이고^[16] 흡수단면적과 분자소멸계수의 관계식은 $\sigma_{gs}=0.385 \times 10^{-20} \epsilon cm^2$ 이다.^[17] 따라서 기저상태 흡수단면적은 약 $9.63 \times 10^{-17} cm^2$ 이다. BDN 유기염료 박막의 기저상태 흡수단면적은 약 $1.0 \times 10^{-16} cm^2$ 이나 여기상태에 대한 기저상태 흡수단면적비 δ는 0.24이다.^[11] 본 연구에 사용된 유기염료박막의 δ는 약 0.3이므로^[10] 식 (3)에 의한 여기상태 흡수단면적은 약 $3 \times 10^{-17} cm^2$ 이다. 두께가 0.0125 mm로 일정하고 초기투과도가 0.51(O.D=0.3), 0.45(O.D=0.35), 0.41(O.D=0.4) 그리고 0.32(O.D=0.5)인 유기염료 박막의 이온 밀도수를 식 (1)을 이용하여 구하면 각각 5.5×10^{17} , 6.4×10^{17} , 7.3×10^{17} 그리고 $9.1 \times 10^{17} cm^{-3}$ 이다.

그림 2는 정상모드와 초기투과도 0.48과 0.38인 Cr⁴⁺:YAG를 사용하여 큐스위칭된 다중 펄스 레이저의 출력에너지 특성을 나타낸 것이다. 포화흡수체가 없는 정상모드의 Nd:YAG 공진

기에서 나타난 인가문턱에너지는 약 4 J이다. 이 때 사용된 출력경의 반사율은 20%이다. Cr⁴⁺:YAG를 이용한 수동형 큐스위칭 공진기에서는 전기적 인가에너지가 증가하여도 레이저의 출력에너지는 그림 2의 점선처럼 일정한 인가에너지 범위에서는 같은 펄스 수가 발생할 뿐 아니라 일정한 레이저 출력에너지를 발생한다. 계속된 인가에너지 증가에 의해 큐스위칭된 레이저의 펄스 수의 증가와 함께 계단 형태의 출력에너지 증가를 보인다.^[12] 초기투과도 0.48인 Cr⁴⁺:YAG에 의한 수동 큐스위칭 레이저 출력특성을 살펴보면, 전기적 인가에너지 5.5~7.2 J에서 나타나는 큐스위칭 단일 펄스의 레이저 출력에너지는 약 $16 \pm 0.5 mJ$ 이고, 7.4~9.0 J에서 이중 펄스로 약 $50 \pm 1 mJ$ 그리고 9.2 J 이상에서는 삼중 펄스로 약 $73 \pm 1 mJ$ 이다. 전기적 인가에너지 증가에 따른 계단 형태의 출력에너지 변화에서 큐스위칭 펄스 수가 증가하는 초기 전기적 인가에너지인 5.5, 7.4 그리고 9.2 J과 이 때 발생한 레이저 출력에너지와의 관계는 그림 2에서 나타난 실선과 같이 선형적이다. 이는 전기광학적 큐스위칭인 능동형 큐스위칭 방법에서 나타나는 인가에너지에 대한 출력에너지 특성과 같은 결과이다.^[18] 초기투과도 0.48과 0.38인 Cr⁴⁺:YAG에서 나타난 인가문턱에너지는 각각 4.5와 4.9 J이다. 이 때 측정 오차범위는 약 $\pm 0.1 J$ 이다. 초기투과도 0.48인 Cr⁴⁺:YAG에서 인가에너지가 5.5 J에서 7.2 J로 증가할 때 큐스위칭 단일펄스의 출력에너지는 동일하지만 펌프광 발생 시작점을 기준으로 할 때 레이저 펄스가 발생하는 수동 큐스위칭 펄스의 열림시간은 빨라진다. 또 계속된 인가에너지 증가에 따라 큐스위칭된 다중펄스들의 열림시간도 빨리 나타난다. 수동 큐스위칭 펄스의 열림시간은 펌핑조건과 포화흡수체의 초기투과도에 의존하지만 인가에너지 증가에 따라 포화흡수체의 포화에너지밀도 도달시간이 빨라져 펄스의 열림시간도 빨라진다. 또 같은 인가에너지 조건에서는 초기투과도가 높을수록 펄스의 열림시간이 빨라진다. 다중 펄스의 발생은 레이저 매질의 밀도반전 증가율이 매우 높고 공진기의 광손실 상태가 최대에서 최소로 매우 느리게 이루어 질 때 발생한다.^[14,19] 포화흡수체의 포화에너지 밀도가 레이저매질의 포화에너지 밀도보다 상대적으로 낮아 충분한 펌핑 조건하에서 밀도반전 상태가 반복적으로 나타날 수 있기 때문이다. 이와 같은 특성을 이용하여 연속 펌핑하에서는 고반복 레이저 발진이 이루어진다.^[3,4,13] 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기에서 나타난 인가문턱에너지의 차이를 식 (12)에 대입하여 구한 Cr⁴⁺:YAG의 포화투과도는 각각 약 0.88 ± 0.02 과 0.80 ± 0.02 로 최대 포화투과도 0.91과 0.88보다 낮게 나타난다. 최대 광자밀도의 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 불포화 기저상태의 밀도수는 식 (5)에서 약 1.6×10^{16} 과 $3.8 \times 10^{16} cm^{-3}$ 이고 총밀도수에 대한 불포화 기저상태 밀도수의 비는 약 5와 12%이다. 연속펌핑하에서 초기투과도가 0.81인 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG를 수동 큐스위칭 소자로 사용한 고반복 Nd:YAG 레이저 출력특성에서 나타난 Cr⁴⁺:YAG의 불포화 기저상태 밀도수는 약 10%로 분석된 바 있다.^[3]

그림 3은 유기염료 박막을 이용하여 얻은 다중펄스에 의한 계단 형태의 출력특성에서 단일, 이중, 삼중 큐스위칭 펄스가 나타나는 초기 전기적 인가에너지와 이 때 얻어진 레이저 출

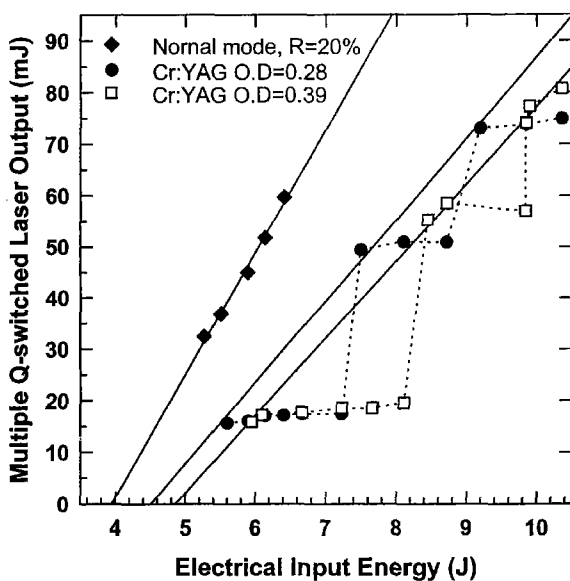


그림 2. 정상모드와 포화흡수체 Cr:YAG를 이용한 1.06 μm Nd:YAG 레이저 에너지의 출력 특성.

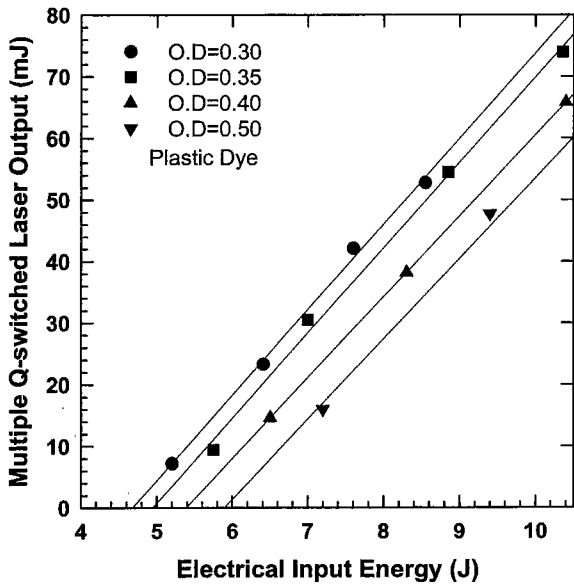


그림 3. 포화흡수체 유기염료 박막을 이용하여 얻은 큐스위칭된 다중펄스의 초기 인가에너지와 출력에너지 특성.

력에너지에 대한 관계만을 보인 것이다. 초기투과도 0.30인 유기염료 박막에 의한 출력특성은 전기적 인가에너지 5.2~6.3 J에서는 단일 큐스위칭 펄스, 6.4~7.5 J에서는 이중 펄스 그리고 7.6~8.5 J에서는 삼중 펄스가 발생하였다. 유기염료 박막의 초기투과도가 0.51, 0.45, 0.41 그리고 0.32일 때, 큐스위칭 다중 펄스의 초기 전기적 인가에너지와 레이저 출력에너지로부터 얻은 수동 큐스위칭 공진기의 인가문턱에너지는 각각 4.7, 5.0, 5.4 그리고 5.9 J이다. 이 때 사용된 출력경 반사율은 20%이다. 정상상태와 큐스위칭 인가문턱에너지 차이를 (13)에 대입하여 얻은 수동 큐스위칭의 최대 광자밀도에서 나타나는 유기염료 박막의 포화투과도는 각각 약 0.83 ± 0.022 , 0.78 ± 0.02 , 0.71 ± 0.018 그리고 0.62 ± 0.016 이다. 또 식 (2)를 통해 얻은 최대 포화투과도는 0.82, 0.79, 0.76 그리고 0.71이다. 유기염료 박막의 초기투과도 0.51에서 나타나는 포화투과도는 기저상태의 완전한 포화흡수로 최대포화투과도와 같은 값을 갖는다. 초기투과도 0.45, 0.4 그리고 0.32에서 큐스위칭 동작 과정에서 나타나는 포화흡수체인 유기염료 박막의 불포화 기저상태 밀도수는 식 (5)에서 약 1.6×10^{16} , 8.6×10^{16} 그리고 $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이고 총밀도수에 대한 불포화 기저상태 밀도수의

비는 각각 2.9, 13.4와 20.5%이다. 초기투과도가 낮을수록 불포화 기저상태 밀도수 증가와 더불어 여기흡수 증가로 수동 큐스위칭 동작시 나타나는 포화흡수체의 포화투과도는 낮아진다. 펄스형 Nd:YAG 레이저 공진기에서 $\delta=0.24$ 인 포화흡수체 BDN 유기염료 박막에 인가되는 레이저 세기 밀도가 포화세기 밀도의 10배일 때 포화흡수체의 포화투과도와 최대 포화투과도와와의 차이는 약 10% 이내로 분석된 바 있다.^[11]

표 1과 2는 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG와 유기염료 박막의 초기투과도 즉 optical density, 최대포화투과도, 광손실과 포화투과도, 총 기저상태 밀도수와 불포화 밀도수에 대한 결과들을 비교한 것이다. 초기투과도가 낮을수록 레이저 발진 문턱에너지가 높은 것은 수동형 큐스위칭 동작에서 포화흡수체의 포화과정에서 나타나는 내부손실이 크다는 것을 의미한다. 또 초기투과도가 낮을수록 포화투과도를 높이기 위해서 보다 강한 내부 레이저광 세기가 주어지도록 높은 출력경 반사율이 필요하다. 큐스위칭 동작에서 나타나는 포화투과도는 최대 포화투과도보다 낮지만 약 10% 이내이다. 초기투과도 0.4인 유기염료 박막보다 초기투과도 0.38인 Cr⁴⁺:YAG의 최대 포화투과도와 큐스위칭 동작에서 나타나는 포화투과도가 높게 나타났다. Cr⁴⁺:YAG는 높은 불포화 기저상태 밀도수를 지니지만 상대적으로 낮은 여기상태 흡수를 보인다.

IV. 결 론

일반적으로 포화흡수체의 포화특성을 이해하기 위해 레이저 빔을 포화흡수체에 직접 조사하여 입사광의 세기 변화에 따른 포화흡수체의 투과도를 측정하므로 포화흡수체의 최대 포화투과도, 기저상태와 여기상태 흡수단면적 그리고 포화에너지밀도 특성을 분석할 수 있다. 이와 같은 방법으로는 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 포화흡수체의 포화투과도를 직접 얻을 수 없다. 수동 큐스위칭 레이저 출력특성은 포화흡수체의 포화투과도와 공진기의 펌핑조건에 의존한다. 따라서 수동 큐스위칭 레이저 공진기에서 레이저매질의 밀도반전과 포화흡수체의 포화특성을 이용하여 광자밀도의 율방정식을 표현할 수 있다. 본 연구에서는 정상모드와 수동형 큐스위칭 공진기에서 나타나는 문턱에너지 차이를 이용하여 포화흡수체의 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 포화흡수체의 광손실을 구하므로 최대

표 1. 큐스위칭 동작과정에서 나타난 포화흡수체 Cr⁴⁺:YAG의 포화특성

O.D	초기투과도	최대포화투과도	측정된 포화투과도	Cr ⁴⁺ :YAG에 의한 광손실	불포화 기저상태 밀도수(cm ⁻³)
0.28	0.48	0.91	0.88 ± 0.02	0.24	1.6×10^{16}
0.39	0.38	0.88	0.80 ± 0.02	0.44	3.8×10^{16}

표 2. 큐스위칭 동작과정에서 나타난 포화흡수체 유기염료 박막의 포화특성

O.D	초기투과도	최대포화투과도	측정된 포화투과도	유기염료 박막에 의한 광손실	불포화 기저상태 밀도수(cm ⁻³)
0.30	0.5	0.82	0.83 ± 0.022	0.35	≈ 0
0.35	0.45	0.79	0.78 ± 0.020	0.50	1.6×10^{16}
0.40	0.4	0.76	0.71 ± 0.018	0.70	8.6×10^{16}
0.50	0.32	0.71	0.62 ± 0.016	0.95	1.5×10^{17}

광자밀도 상태에서 포화흡수체의 불포화 기저상태 밀도수와 포화투과도를 구하였다. 포화흡수체의 초기투과도가 낮아질수록 수동 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 포화흡수체에 의한 광손실은 증가하였다. 이는 초기투과도가 낮을수록 여기상태 흡수와 기저상태 밀도수의 불포화가 증가하기 때문이다. 따라서 초기투과도가 낮고 포화에너지 밀도가 클수록 높은 출력경 반사율을 사용하는 것이 효율적이다. 이는 높은 출력경을 사용하므로 공진기내에서 포화흡수체를 통과하는 레이저 출력세기를 높일 수 있기 때문이다.^[11] 수동 큐스위칭된 단일펄스 레이저의 최대 출력에너지를 얻기 위해서는 Cr⁴⁺:YAG의 초기투과도가 0.38일 때 최적 출력경 반사율은 약 35%이고 초기투과도 0.4인 유기염료 박막에서의 최적 출력경 반사율은 약 29%이다. 이는 포화흡수체에 의한 광손실이 달라 레이저 공진기의 최적조건이 달라지기 때문이다. 큐스위칭 동작에서 나타나는 Cr⁴⁺:YAG의 포화 투과도는 유기염료 박막보다 상대적으로 높다. 또 Cr⁴⁺:YAG는 높은 불포화 기저상태 밀도수를 지니지만 상대적으로 낮은 여기상태 흡수를 보인다. 초기투과도 0.48과 0.38에서 Cr⁴⁺:YAG의 포화투과도는 각각 약 0.88±0.02과 0.80±0.02로 최대 포화투과도 0.91과 0.88보다 낮다. 또 큐스위칭 동작과정에서 나타나는 총밀도수에 대한 불포화 기저상태 밀도수의 비는 약 5와 12%이다. 초기투과도 0.45, 0.4 그리고 0.32에서 유기염료 박막의 불포화 기저상태 밀도수의 비는 각각 2.9, 13.4와 20.5%로 초기투과도가 낮을수록 기저상태의 불포화가 높게 나타난다.

참고문헌

- [1] P. Yankov, *J. Phys.*, D, vol. 27, P. 1118, 1994.
 [2] Y. Shimony, Z. Burshtein, and Y. Kalisky, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, pp. 1738-1741, 1995.
 [3] Y. Shimony, Z. Burshtein, A. B.-A. Barabga, Y. Kalisky, and M. Strauss, *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 32, pp. 305-310, 1996.
 [4] 정태문, 김광석, 문희중, 이종훈, 김철중, 이종민, 한국광학회지, vol. 9, p. 231, 1998.
 [5] J. A. Morris and C. P. Pollock, *Opt. Lett.*, vol. 15, p. 440, 1990.
 [6] K. Spariosu, W. Chen, R. Stultz, and M. Birnbaum, *Opt. Lett.*, vol. 18, p. 814, 1993.
 [7] 추한태, 이봉연, 양준목, 이동한, 임기수, 이치원 한국광학회지, vol. 10, p. 226, 1999.
 [8] A. Brignon and J. P. Huignard, *Opt. Lett.*, vol. 21, p. 1126, 1996.
 [9] H. Eilers, K. R. Hoffman, W. M. Dennis, S. M. Jacobsen, and W. M. Yen, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, p. 2958, 1992.
 [10] 고희석, 전용근, 새물리, vol. 39, p. 113, 1999.
 [11] X. Zhang, S. Zhao, Q. Wang, Y. Liu, and J. Wang, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, pp. 905-908, 1994.
 [12] X. Zhang, S. Zhao, Q. Wang, Y. Liu, and J. Wang, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, pp. 2286-2294, 1997.
 [13] J. J. Degnan, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, p. 1890, 1995.
 [14] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 5th ed. (Springer-Verlag, 1999), Ch. 8.
 [15] B. A. See, *Opt. Eng.*, vol. 33, p. 3364, 1994.
 [16] K. H. Drexhage and U. T. Muller-Westerhoff, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 8, p. 759, 1972.
 [17] F. P. Schafer, *Dye Lasers* (Springer-Verlag, 1977), p. 33.
 [18] 최영수, 박용찬, 강응철, 김재기, 응용물리, vol. 5, p. 447, 1992.
 [19] Siegman, *Lasers* (University Science Books, California, 1990), pp. 1020-1028.

The saturating property of Cr⁴⁺:YAG and dye film as the saturable absorber

Young Soo Choi[†], Yong Geun Jeon, and Jai Ki Kim

Agency for Defense Development, TEDC-1-5, Taejon 305-600, KOREA

[†]E-mail: youngs26@sunam.kreonet.re.kr

(Received December 26, 2000 ; Revised manuscript received April 10, 2001)

To analyze the saturating process of Cr⁴⁺:YAG crystal and plastic organic dye as the saturable absorber, we have measured the residual optical losses between a free running and a passive Q-switching mode for various optical densities. The undepleted ground state population density and the saturated transmission of the saturable absorber have been evaluated by the additional optical losses with the increased threshold pump energies between two resonators. In the passive Q-switching mode, the saturable transmission of saturable absorber is less than the maximum saturable transmission due to the undepleted ground state population density.

Classification code : LO.080.