

파장가변 티타늄 사파이어 레이저로 펌핑하는 연속발진 Nd:YVO₄/KTP 레이저의 출력 특성

추한태[†] · 안범수 · 김규욱

금오공과대학교 자연과학부

Ⓧ 730-701 경북 구미시 신평동 188번지

이치원

공주대학교 영상정보공학부

Ⓧ 314-712 충남 공주시 옥룡동 326번지

(2002년 1월 15일 받음, 2002년 2월 22일 수정본 받음)

선폭 0.2 nm인 파장가변 티타늄 사파이어 레이저를 펌핑 레이저로 사용하여 펌핑 레이저의 S-편광(E⊥π)과 P-편광(E∥π) 그리고 파장 변화 등에 따라 두께 1 mm인 Nd:YVO₄ 결정의 흡수율 및 연속 발진 Nd:YVO₄/KTP 레이저의 출력 특성을 측정하였다. 그 결과 S-편광 및 P-편광 펌핑 레이저의 파장에 따른 Nd:YVO₄ 결정의 최대 흡수율은 각각 809.4 nm일 때 82% 및 808.8 nm일 때 98%로 측정되었으며, 기본파인 Nd:YVO₄ 레이저(1064 nm) 출력의 기울기 효율은 각각 43% 및 52%로 측정되어 1000 mW 출력의 P-편광 펌핑 레이저에 대하여 최대 516 mW의 Nd:YVO₄ 레이저 출력을 얻을 수 있었다. 또한 P-편광 펌핑 레이저에 대한 내부공진기 진동수 배가된 제2고조파 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저(532 nm) 출력 기울기 효율은 23%로 측정되었으며 1000 mW 펌핑 출력에 대하여 빔질 파라미터 M²=1.42인 최대 205 mW의 출력을 얻을 수 있었다.

주제어 : Laser principles, Solid-state laser, Nonlinear optics.

I. 서 론

Nd:YVO₄(Neodymium doped yttrium orthovanadate) 결정은 Nd³⁺ 이온의 도핑 농도에 따라 약간 다르지만 595 nm, 752 nm 및 809 nm 근처의 파장에 대하여 강한 흡수 단면적을 갖고 있고 레이저 발진 파장에서 큰 유도 방출 단면적을 가지고 있으므로 다이오드 레이저(LD)로 펌핑하는 고체 레이저 가운데 가장 효율이 좋은 레이저 매질 중의 하나로 알려져 있다. 또한 우수한 물리적, 광학적 및 역학적 특성 뿐 아니라 결정 손상 문턱값이 높고, Nd:YAG 결정과는 달리 0.5~3.0 at.%의 Nd³⁺ 도핑율과 1.0~3.0 mm 두께의 얇은 결정으로도 넓은 파장 영역의 펌핑 레이저 입사 빛을 대부분 흡수하므로 소형이면서도 고효율 적외선 레이저로 개발하기가 더욱 적합하다.

최근에는 소형의 안정된 적외선 레이저^[1-4] 뿐 아니라 비선형 결정인 KTP(potassium titanyl phosphate, KTiOPO₄) 등을 이용한 내부공진기 진동수 배가(intracavity frequency doubling)로 연속 발진 녹색 레이저(Nd:YVO₄/KTP 레이저)^[5-7]를 개발하거나 Cr:YAG 결정을 포화 흡수체로 이용한 소형의 Q-스위칭 Nd:YVO₄ 레이저 및 Q-스위칭 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저 개발^[8-10]에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. Nd:YVO₄ 레이저의 발진 파장은 914 nm, 1064 nm 및 1342 nm이며 Nd:YAG 레이저와 같이 1064 nm가 가장 강한 것으로 알려져 있다. 이때 Nd:YVO₄ 레이저의 출력은 Nd:YVO₄ 결

정이 흡수 파장을 809 nm에서 최대의 흡수 단면적을 갖는 자연적인 복굴절성 결정이므로 결정의 광축에 평행한 비정상 방향(π-방향)^[11]으로 선형 편광되어 있다. 따라서, 결정의 자른 방향(a-cut 및 c-cut)과 Nd³⁺ 도핑을 및 펌핑 레이저의 편광 방향과 파장에 따라 민감하게 출력 변동이 나타나게 된다. 따라서, 본 실험에서도 선폭 0.2 nm인 파장가변 티타늄 사파이어 레이저를 펌핑 레이저로 사용하여 펌핑 레이저의 S-편광(E⊥π)과 P-편광(E∥π) 그리고 파장 변화 등에 따라 두께 1 mm인 Nd:YVO₄ 결정의 흡수율을 비롯하여 기본파인 연속 발진 Nd:YVO₄ 레이저(1064 nm)와 비선형 결정인 KTP를 이용하여 내부공진기 진동수 배가시킨 제2고조파 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저(532 nm)의 출력 특성 등에 대하여 조사하였다.

II. 기본파 및 제2고조파 출력

다이오드 레이저(LD) 또는 기타 다른 레이저로 전반사 거울과 출력 거울 사이에 있는 레이저 결정의 단면을 펌핑하는 고체 레이저 시스템에서의 기본파의 레이저 출력 P_{out} 는^[4,12,13]

$$P_{out} = \left(\frac{T}{T+L} \right) \eta_a \eta_S \eta_Q \eta_B P_{in} - \frac{I_S A T}{2} \quad (1)$$

가 된다. 여기서 η_a 는 레이저 결정으로의 흡수 효율(absorption efficiency), η_S 는 Stokes 인자(펌핑 광자 에너지에 대한 레이저 광자 에너지 비율 = $h\nu_L/h\nu_p = \lambda_p/\lambda_L = 0.76$), η_Q 는 상준위 양자 효율(upper-level quantum efficiency), η_B 는 공

[†]E-mail: htchoo@knut.kumoh.ac.kr

진기 모드-펌핑 모드의 중첩 효율(overlap efficiency)으로써 $\eta_B = 2w_p^2/(w_c^2 + w_p^2)$ 이고 w_c 및 w_p 는 각각 공진기 모드 및 펌핑 모드 빔 허리를 나타낸다. 또한 P_{in} 는 입사 펌핑 출력, T 는 레이저 출력 거울의 투과율, L 은 왕복 공진기 손실(round-trip cavity loss), A 는 펌핑 모드 빔의 단면적($=\pi w_p^2$), I_S 는 포화 강도(saturation intensity)로써 $I_S = hc/\sigma\tau\lambda_p$ 이며 h 와 c 는 각각 Planck 상수 및 빛 속도 그리고 σ 및 τ 는 각각 유효 유도 방출 단면적(effective stimulated emission cross section) 및 유효 상준위 수명(effective upper-level lifetime)으로 808 nm의 펌핑 파장에 대하여 Nd:YVO₄ 결정의 σ 및 τ 는 각각 $\sigma = 25.0 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ 및 $\tau = 115 \mu\text{s}$ 의 값을 갖는다.^[4] 또한 레이저 출력을 기울기 효율(slope efficiency) σ_{slope} 와 레이저 발진 문턱에서의 펌핑 출력 P_{Th} 로 나타내면

$$P_{out} = \sigma_{slope} (P_{in} - P_{Th}) \quad (2)$$

이 되며, 이때 기울기 효율 σ_{slope} 및 레이저 발진 문턱에서의 펌핑 출력 P_{Th} 는 각각

$$\sigma_{slope} = \left(\frac{T}{T+L} \right) \eta_a \eta_s \eta_Q \eta_B \quad (3)$$

및

$$P_{Th} = \left(\frac{T+L}{2} \right) \frac{AI_S}{\eta_a \eta_s \eta_Q \eta_B} = \frac{\pi(w_c^2 + w_p^2)hc}{4\sigma\tau\lambda_p \eta_a \eta_s \eta_Q} (L+T) \quad (4)$$

가 된다. 또한 출력 거울의 투과율 $T (= -\ln R)$ 과 공진기 손실 L 및 P_{Th} 의 관계는

$$-\ln R = 2K P_{Th} - L \quad (5)$$

이 되며, 여기서 R 은 반사율이고 $K = \eta_a \eta_s \eta_Q \eta_B / AI_S$ 이다. 따라서 공진기 손실 L 은 레이저 공진기 출력 거울의 반사율에 따른 레이저 발진 문턱에서의 펌핑 출력 P_{Th} 를 측정하면 실험적으로 구할 수 있으며, 위 식들로부터 공진기 손실 L 과 공진기 모드-펌핑 모드의 중첩 효율 η_B 등이 레이저 출력에 크게 기여함을 알 수 있다.

한편 Smith의 이론적 분석^[14]에 의하면, 공진기 내에 KTP 등과 같은 비선형 결정을 삽입하여 내부공진기 진동수 배가된 제2고조파 출력 P_{SHG} 은

$$P_{SHG} = \frac{K P_c^2}{\pi w_c^2} \quad (6)$$

및

$$K = \frac{4w_c^2}{w_n^2} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \frac{\omega^2 d_{eff}^2 I_n^2}{n^3 c^2} \quad (7)$$

로 표현된다. 여기서, I_n , n 및 d_{eff} 는 각각 비선형 결정의 길이, 굴절률 및 유효 비선형 계수(effective nonlinear coefficient)이며 ω 는 라디안(radian) 진동수, w_n 은 비선형 결정에서의 빔 반경을 나타낸다. 또한 공진기 내에서 레이저의 왕복(round-

trip) 선형 및 비선형 손실의 합은 왕복 이득과 같으므로 정상 상태에서 순환하는 기본파 출력(fundamental circulating power) P_c 는^[6,14,15]

$$4KS\xi \left(\frac{P_c}{\pi w_c^2} \right)^2 + (4\delta S\xi + K) \frac{P_c}{\pi w_c^2} + (\delta - 2G) = 0 \quad (8)$$

가 되며, 여기서

$$G = \frac{2\sigma\tau\lambda_p P_{in} [1 - \exp(-\alpha_p l)]}{\pi h c (w_p^2 + w_c^2)} \quad (9)$$

이며, δ 는 공진기의 총 왕복 손실로 $\delta = \delta_0 + 2\alpha_c l + 2\alpha_n l_n$ 이고, δ_0 은 출력 거울의 투과율 T 를 포함하는 공진기 거울 코팅에 의한 손실, α_c 및 α_n 은 각각 레이저 결정 안에서 단위 길이당 분포된 손실 및 기본파 파장에서 비선형 결정의 흡수 계수 그리고 l 및 l_n 은 각각 레이저 결정 및 비선형 결정의 길이를 나타낸다. 또한 α_p 는 펌핑 파장에 대한 레이저 결정의 흡수 계수이고 S 는 포화 강도 I_S 의 역수($=\sigma\tau\lambda_p/hc$)이며, $\xi = 1 - 0.92 w_p^2/(w_c^2 + w_p^2)$ 를 나타낸다. 이때 레이저 매질인 Nd:YVO₄ 결정에 대하여 $\omega = 1.78 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$ 와 $\alpha_p = 30 \text{cm}^{-1}$ 이며, 비선형 결정인 KTP에 대하여 $\alpha_n = 5 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$, $n = 1.83$ 그리고 $d_{eff} = 3.2 \times 10^{-12} \text{mV}^{-1}$ 의 값을 갖는다.^[4] 따라서 식 (6)과 식 (8)로부터 제2고조파 출력인 P_{SHG} 는 펌핑 출력과 펌핑 빔 크기의 함수, 공진기 파라미터 그리고 레이저와 비선형 결정 파라미터로 나타낼 수 있으며, 이 두식을 조합하면 공진기를 최적화시켜 내부공진기 진동수 배가된 제2고조파 출력을 평가하는데 사용할 수 있다.

III. 실험결과 및 논의

파장가변 티타늄 사파이어 레이저를 이용하여 펌핑 레이저의 편광(S-편광 및 P-편광) 및 파장 변화 등에 따라 단면 펌핑하는 연속 발진 Nd:YVO₄ 레이저와 비선형 결정 KTP를 이용하여 내부공진기 진동수 배가된 제2고조파 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저를 위한 실험 장치를 그림 1에 나타내었다.

실험에 사용된 티타늄 사파이어 레이저는 자체 제작한 레이저로 735 nm~925 nm 영역에서 선폭이 0.2 nm이고 900 mW 이상의 출력을 갖으며 편광 회전기(polarization rotator, P.R.)

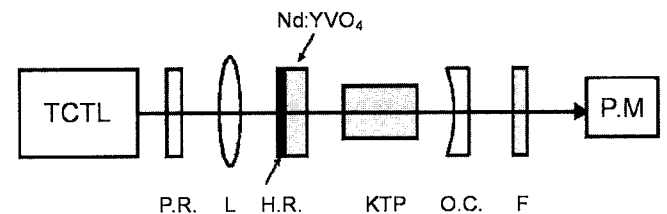


그림 1. 티타늄 사파이어 레이저로 단면 펌핑하는 Nd:YVO₄ 레이저 및 내부공진기 진동수 배가된 제2고조파 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저를 위한 실험 장치 개략도(TCTL: tunable continuous wave Ti: sapphire laser, P.R.: polarization rotator, L: lens, H.R.: high reflector, O.C.: output coupler, F: filter, P.M.: power meter).

를 이용하여 편광을 조정한 후 초점거리 50 mm인 볼록 렌즈(L)를 통해 단면의 넓이 $3 \times 3 \text{ mm}^2$, 두께가 1 mm이고 Nd^{3+} 이온 도핑 농도가 1.0 atm.%인 Nd:YVO_4 결정(a-cut, Castech 제품)으로 집속된다. 이때, 결정의 한 쪽 면은 곡률이 없는 평면으로 펌핑 레이저 파장인 808 nm에서 고투과($R < 5\%$)하고 레이저 발진 파장인 1064 nm 및 532 nm에서 고반사($R > 99\%$) 되도록 하여 공진기의 평면 전반사 거울로 사용하였고, 다른 한쪽 면은 1064 nm에서 무반사 코팅하고 열전 냉각기(thermal electric cooler)를 이용하여 항상 일정한 온도를 유지시켜 출력 효율 및 안정성을 높였다. 기본파의 출력 거울(O.C.)은 곡률 반경이 100 mm이고 1064 nm에서의 반사율 $R = 98\%$ 인 오목 거울을 사용하였으며, 크기가 $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ 인 제2종 위상 정합 KTP 결정(Castech 제품)을 이용한 제2고조파 출력 거울은 1064 nm에서 고반사하고 532 nm에서 고투과하는 곡률 반경 125 mm의 오목 거울을 각각 사용하였다. 이때 기본파 및 제2고조파 출력은 각각 1064 nm 및 532 nm 필터(F)를 통과한 후 출력 측정기(P.M.)로 측정하였다.

그림 2의 (a)에는 펌핑 레이저의 편광 방향 및 파장 변화에 대한 두께 1 mm인 Nd:YVO_4 결정의 흡수율을 나타내었고, (b)에는 곡률 반경 100 mm의 출력 거울($R = 98\%$)을 이용하여 13 mm 길이의 레이저 공진기를 구성한 후 그때의 Nd:YVO_4 레이저(1064 nm) 출력을 측정하여 나타내었다. 이때, 펌핑 레이저의 파장가변 영역은 752 nm에서 812 nm까지 0.2 nm 간격으로 수행하였다. 또한 최대의 레이저 출력을 얻을 수 있도록 초점 거리 50 mm의 집속 렌즈 L과 결정 끝면(H.R.)과의 거리는 마이크로미터를 이용하여 미세하게 변화시켰으며, 이때 결정 끝면으로 집속되는 펌핑 레이저의 빔 크기($2w_p$)는 204 μm 로 측정되었다.

그림 2에서와 같이 S-편광 및 P-편광 모두 757 nm 부근에서 65% 이상의 흡수율을 보였으나, P-편광인 경우가 흡수 밴드폭이 더 넓고, 최대의 흡수율은 S-편광인 경우 809.4 nm에서 82%, P-편광인 경우는 808.8 nm에서 98%로 측정되었다. 또한 900 mW의 입사 펌핑 레이저 출력에 대한 Nd:YVO_4 레이저 출력은 S-편광 및 P-편광의 경우 각각 364 mW 및 463 mW로 측정되어 P-편광을 갖는 레이저로 펌핑하는 것이 더 효율적임을 확인할 수 있었다.

그림 3은 곡률 반경 100 mm의 출력 거울($R = 98\%$)을 이용하여 13 mm의 공진기 길이를 구성한 후 S-편광 및 P-편광을 갖는 입사 펌핑 레이저 출력에 대한 Nd:YVO_4 레이저의 출력을 측정하여 각각 나타내었다.

그림 3에서와 같이 1000 mW의 출력의 S-편광 및 P-편광 펌핑 레이저에 대한 Nd:YVO_4 레이저의 최대 출력은 각각 402 mW 및 516 mW로 측정되었고, 입사 펌핑 출력에 대한 Nd:YVO_4 레이저 출력 기울기 효율(σ_{slope})은 각각 43% 및 52%로 측정되었다. 또한 P-편광에 대하여 출력 거울의 반사율을 달리하여 레이저 발진 문턱에서의 펌핑 출력(P_{th})을 측정된 결과 $R = 98\%$, $R = 95\%$ 및 $R = 88\%$ 인 경우 각각 6 mW, 13 mW 및 30 mW로 측정되었다. 따라서 식 (5)를 이용하여 공진기 왕복 손실을 구한 결과 $L = 0.005$ 및 $K = 2.085 \times 10^{-3}$ 임을 알 수 있다.

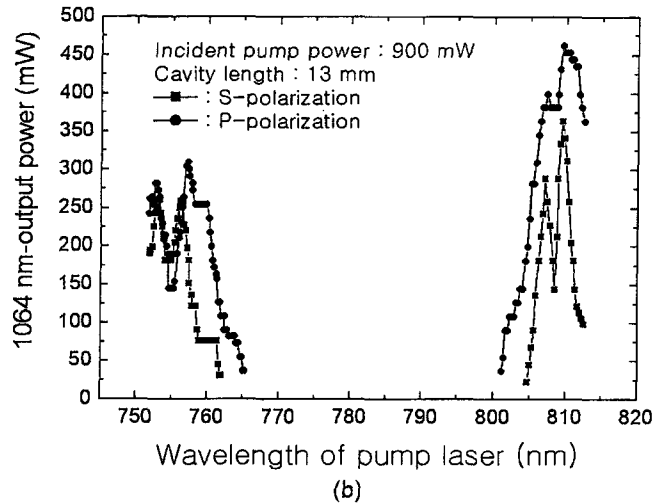
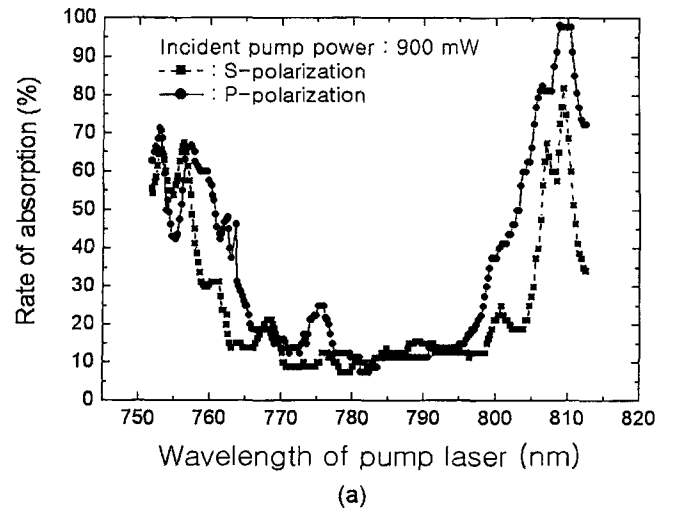


그림 2. 티타늄 사파이어 펌핑 레이저의 편광 방향과 파장 변화에 대한 (a) Nd:YVO_4 결정의 흡수율 및 (b) Nd:YVO_4 레이저 출력.

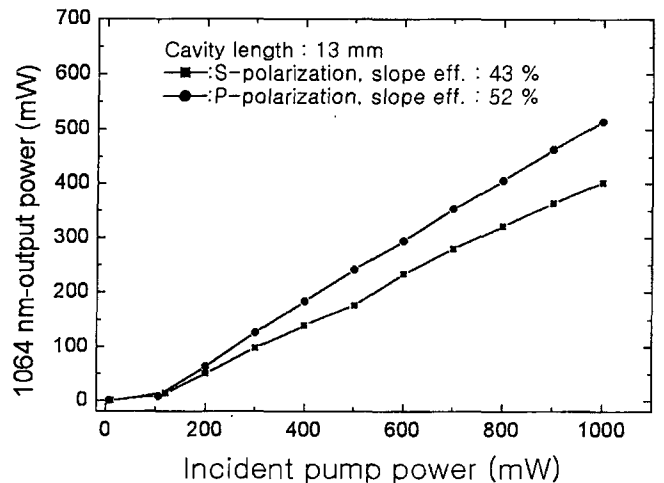


그림 3. S-편광 및 P-편광을 갖는 티타늄 사파이어 레이저 입사 펌핑 출력에 대한 Nd:YVO_4 레이저의 출력 특성.

그림 4는 S-편광 및 P-편광을 갖는 펌핑 레이저 출력을 900 mW로 고정하여 공진기 길이 변화(5 mm~50 mm)에 대한 Nd:YVO₄ 레이저의 출력을 측정하고, 각각의 공진기 길이에 대한 평면-오목 거울 공진기에 대한 공진기 모드 허리(cavity mode waist : w_c)^[16]를 계산하여 각각 나타냈다. 이때, 그림에서의 실선은 P-편광에 대하여 식 (2)~식 (4)와 Nd:YVO₄ 결정에 대한 각 상수들을 이용하여 계산한 결과이다.

계산 결과와 유사하게 공진기 길이가 증가할수록 Nd:YVO₄ 레이저 출력도 감소하며, 이는 공진기 길이가 증가할수록 공진기 모드 허리(w_c)가 증가하여 이에 따른 공진기 모드-펌핑 모드의 중첩 효율($\eta_B = 2w_p^2 / (w_c^2 + w_p^2)$)이 감소하기 때문으로 생각된다.

그림 5는 평면-오목형 공진기에서 출력 거울을 1064 nm에서 고반사하고 532 nm에서 고투과하는 곡률 반경 125 mm의 제 2고조파 출력 거울로 교체하여 공진기 길이를 22 mm로 늘리고 비선형 결정인 KTP를 삽입한 후 P-편광 티타늄 사파이어 레이저 입사 펌핑 출력에 대한 내부공진기 진동수 배가된 제 2고조파 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저(532 nm)출력을 측정하여

나타냈다. 그림에서의 실선은 식 (6)~식 (8)과 KTP 결정에 대한 각 상수들을 이용하여 P-편광 입사 펌핑 출력(P_m)에 대한 제2고조파 출력(P_{SHG})을 계산한 결과이다.

그림 5에서와 같이 제2고조파인 녹색 레이저 출력 특성은 계산한 결과와 거의 일치하고 있으며, 1000 mW 입사 펌핑 출력에 대하여 최대 205 mW의 출력을 얻을 수 있었고 식 (1)을 이용하여 최소 자승법으로 기울기를 구한 결과 입사 펌핑 출력에 대한 제2고조파 출력 기울기 효율은 23%로 측정되었다.

그림 6에는 P-편광을 갖는 입사 펌핑 출력을 800 mW로 고정하고 KTP가 삽입된 평면-오목형 공진기 길이 변화(20 mm~120 mm)에 따른 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저 출력을 측정하고 그때의 공진기 모드 허리를 계산하여 나타내었다. 그림에서의 실선은 식 (6)~식 (8)과 KTP 결정에 대한 각 상수들을 이용하여 공진기 길이에 대한 제2고조파 출력을 계산한 결과이다.

그림 6에서와 같이 공진기 길이가 20 mm 및 120 mm일 때 각각 130 mW 및 150 mW의 출력을 얻을 수 있었으며 전반적으로 출력 특성이 계산 결과와 잘 일치하였다. 따라서 출력

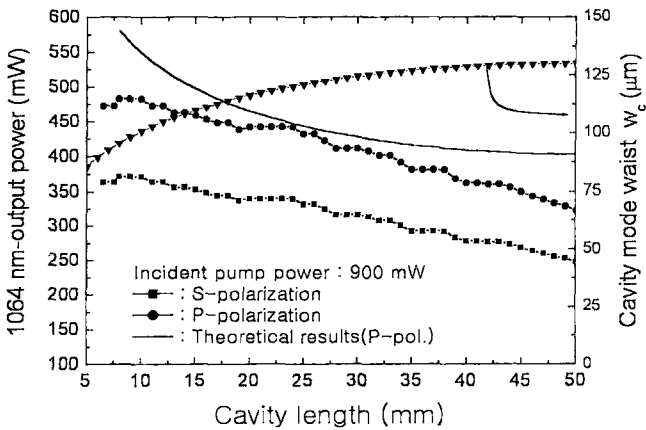


그림 4. 평면-오목 거울 공진기 길이에 따른 Nd:YVO₄ 레이저의 출력과 공진기 모드 허리.

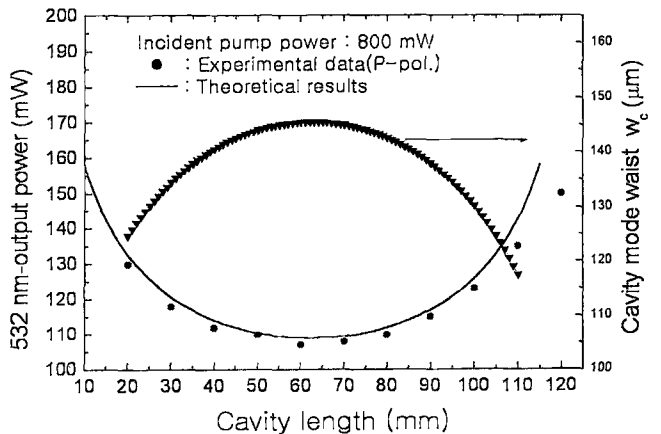


그림 6. KTP가 삽입된 평면-오목형 공진기 길이에 따른 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저 출력과 공진기 모드 허리.

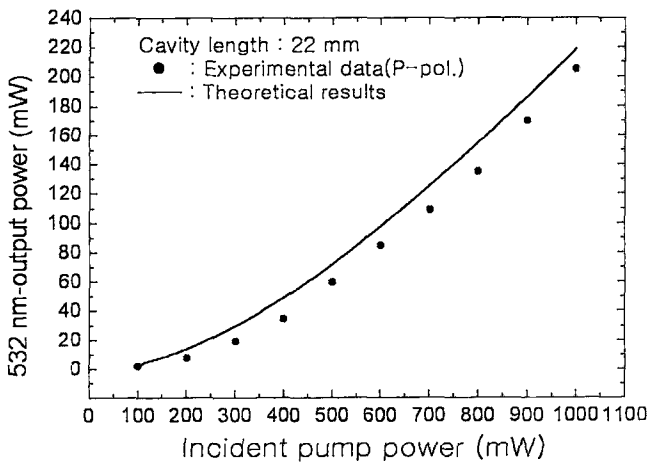


그림 5. P-편광 티타늄 사파이어 레이저 입사 펌핑 출력에 대한 내부공진기 진동수 배가된 제2고조파 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저(532 nm) 출력.

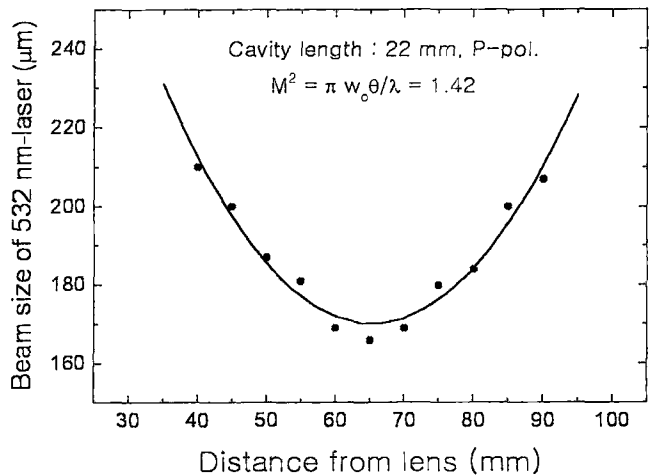


그림 7. 렌즈로부터의 거리에 따른 집속된 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저의 빔 크기.

거울의 투과율 및 곡률 반경과 집속 렌즈 L의 초점 거리에 의한 펌핑 모드 크기 등을 잘 조절하면 공진기 길이가 짧으면서도 최대의 공진기 모드-펌핑 모드의 중첩 효율을 갖는 공진기를 구성할 수 있으므로 소형이면서도 레이저 출력 효율을 높일 수 있을 것 이라고 생각된다.

그림 7은 집속된 녹색 레이저의 빔 허리를 측정하여 빔질 파라미터(beam-quality parameter, M^2)를 구하기 위하여 초점 거리가 60 mm인 볼록 렌즈, 면도날이 부착된 Chopper, 광다이오드 및 디지털 오실로스코프를 이용하여 렌즈로부터 거리에 따른 녹색 레이저의 빔 직경을 측정하여 나타냈다.

그림 7로부터 녹색 레이저의 빔 허리는 85 μm 이며, 빔 직경 측정 결과를 $w^2 = w_0^2 [1 + M^2 (\lambda(z - z_0)/\pi w_0^2)^2]$ 의 식을 이용하여 최소 자승법으로 M^2 를 구한 결과 1.42로 계산되었다.

IV. 결 론

선폭 0.2 nm인 파장가변 티타늄 사파이어 레이저를 펌핑 레이저로 사용하여 펌핑 레이저의 S-편광(E \perp)과 P-편광(E \parallel) 그리고 파장 변화 등에 따라 두께 1 mm인 Nd:YVO₄ 결정의 흡수율 과 기본파인 연속 발진 Nd:YVO₄ 레이저(1064 nm)의 출력 특성을 측정하였다. 또한 비선형 결정인 KTP를 이용하여 내부공진기 진동수 배가시킨 제2고조파 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저(532 nm)의 출력 특성에 대하여 조사하였다. 그 결과 입사 펌핑 레이저의 편광 방향 및 파장에 대한 Nd:YVO₄ 결정의 최대 흡수율은 S-편광인 경우는 809.4 nm에서 82%이고 P-편광인 경우 808.8 nm에서 98%로 측정되었으며, 기본파인 Nd:YVO₄ 레이저 출력의 기울기 효율은 S-편광 및 P-편광에 대하여 각각 43% 및 52%로 측정되어 1000 mW의 출력의 P-편광 티타늄 사파이어 펌핑 레이저에 대하여 최대 516 mW의 Nd:YVO₄ 레이저(1064 nm) 출력을 얻을 수 있었다. 또한 P-편광 티타늄 사파이어 펌핑 레이저에 대하여 내부공진기 진동수 배가된 제2고조파 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저(532 nm) 출력 기울기 효율은 23%로 측정되었으며, 1000 mW 펌핑 출력에 대하여 빔질 파라미터 $M^2 = 1.42$ 인 최대 205 mW의 출력을 얻을 수 있었다. 앞으로 안정된 고출력 소형화 연속 발진 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저 및 Cr:YAG 포화 흡수체를 이용한 Q-스위칭 Nd:YVO₄/KTP 녹색 레이저에 대한 연구를 진행시킬 예정이다.

감사의 글

본 연구 과제는 금오공과대학교 2001년 자유공모과제연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] R. A. Fields, M. Birnbaum, and C. L. Fincher, "Highly effi-

cient Nd:YVO₄ diode-laser end-pumped laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, no. 23, pp. 1885-1886, 1987.

[2] T. Taira, A. Mukai, G. Mizell, and T. Kobayashi, "Single-mode oscillation of laser-diode-pumped Nd:YVO₄ microchip laser," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 24, pp. 1955-1957, 1991.

[3] R. Scheps, J. F. Myers, G. Mizell, and K. Yates, "Internally folded Nd:YAG and Nd:YVO₄ lasers pumped by laser diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 9, pp. 2132-2135, 1994.

[4] D. C. Brown, R. Nelson, and L. Billings, "Efficient cw end-pumped, end-cooled Nd:YVO₄ diode-pumped laser," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 33, pp. 8611-8613, 1997.

[5] Y.-F. Chen, T.-M. Huang, C.-L. Wang, and L.-J. Lee, "Compact and efficient 3.2-W diode-pumped Nd:YVO₄/KTP green laser," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 24, pp. 5727-5730, 1998.

[6] D. Shen, A. Liu, J. Song, and K. I. Ueda, "Efficient operation of an intracavity-doubled Nd:YVO₄/KTP laser and pumped by a high-brightness laser diode," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 33, pp. 7785-7788, 1998.

[7] G. J. Friel, A. J. Kemp, T. K. Lake, and B. D. Sinclair, "Compact and efficient Nd:YVO₄ laser that generates a tunable single-frequency green output," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 24, pp. 4333-4337, 2000.

[8] 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.*, vol. 36, no. 12, pp. 2468-2472, 2000.

[9] Y.-F. Chen, "Passive Q-switching of an intracavity frequency doubled-pumped Nd:YVO₄/KTP green laser with Cr⁴⁺:YAG," *IEEE Photo. Tech. Lett.*, vol. 9, no. 11, pp. 1481-1483, 1997.

[10] Y.-F. Chen, S. W. Tsai, and S. C. Wang, "High-power diode-pumped Q-switched and mode-locked Nd:YVO₄ laser with a Cr⁴⁺:YAG saturable absorber," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 19, pp. 1442-1444, 2000.

[11] G. J. Kintz and T. Baer, "Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths," *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 26, no. 9, pp. 1457-1459, 1990.

[12] W. Koechner, "Solid-state Laser Engineering," 4th ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1996), Chap. 3, p. 98.

[13] T. Kasamatsu and H. Sekita, "Laser-diode-pumped Nd:YAG active laser," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 9, pp. 1879-1881, 1997.

[14] R. J. Smith, "Theory of intracavity optical second-harmonic generation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 4, pp. 215-223, 1970.

[15] A. J. Alfrey, "Modeling of longitudinally pumped cw Ti:sapphire laser oscillators," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 4, pp. 760-766, 1989.

[16] W. Koechner, "Solid-state Laser Engineering," 4th ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1996), Chap. 5, p. 198.

Output power characteristics of a CW Nd:YVO₄/KTP laser pumped by a tunable Ti:Sapphire laser

Han Tae Choo[†], Bum Soo Ahn, and Gyu Ug Kim

School of Natural Science, Kumoh National University of Technology, Kumi 730-701, KOREA

[†]*E-mail: htchoo@kmut.kumoh.ac.kr*

Chi Weon Lee

Division of Computer and Media Information Engineering, Kongju National University, Kongju 314-712, KOREA

(Received January 15, 2002 ; revised manuscript received February 22, 2002)

We measured the absorption rate of a Nd:YVO₄ crystal with a thickness of 1 mm and the output power characteristics of a cw Nd:YVO₄/KTP laser with respect to the change of wavelength and the polarizations of a tunable Ti:sapphire pump laser with a linewidth of 0.2 nm. In the case of S-polarization ($E \perp \pi$) and P-polarization ($E \parallel \pi$) of a pump laser, the maximum absorption rate of the crystal was 82% at 809.4 nm and 98% at 808.8 nm, and slope efficiencies for the output power of the Nd:YVO₄ laser (1064 nm) were 43% and 52%, respectively. The maximum Nd:YVO₄ laser output power of 516 mW was obtained from the P-polarization pump laser of 1000 mW. As a result of an intracavity frequency-doubling, slope efficiency for the output power of the Nd:YVO₄/KTP green laser (532 nm) was 23% and the maximum output power of 205 mW with the beam quality (M^2) of 1.42 was obtained from the P-polarization pump laser of 1000 mW.

Classification codes : LO.070, LO.080, NL.010.