

Cr⁴⁺:YAG 포화 흡수체를 이용한 Ti:sapphire 레이저 여기 Nd:YAG 레이저의 수동형 Q-switching 특성

안범수 · 추한태 · 김규욱[†]

금오공과대학교 자연과학부
Ⓣ730-701 경북 구미시 신평동 188

(2004년 3월 22일 받음, 2004년 5월 10일 수정본 받음)

Ti:sapphire 레이저로 펌핑하는 연속발진 Nd:YAG 레이저의 출력 특성과 Cr⁴⁺:YAG 결정을 포화 흡수체로 이용하는 수동형 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 평균 출력, 펄스폭 및 반복률 등의 특성을 조사하였다. 그 결과 Nd:YAG 결정에 입사되는 Ti:sapphire 레이저의 펌핑 출력이 850 mW일 때, 연속 발진 Nd:YAG 레이저의 출력이 450 mW로 측정되어 출력 기울기 효율이 약 56%로 계산되었다. 또한, 초기 투과율이 90%인 Cr⁴⁺:YAG 결정을 이용하여 수동형 Q-switching된 Nd:YAG 레이저 출력이 200 mW로 측정되었고, 이때의 펄스 반복률 및 펄스폭은 각각 23.8 kHz 및 17.0 ns로 측정되었다.

주제어 : Nd:YAG laser, Ti:sapphire laser, Cr:YAG, Q-switching, 포화흡수

I. 서 론

최근의 레이저 개발 경향은 고체 레이저에서 선택적 여기를 유도하여 열부하를 최소화시키고, 고품질의 빔과 높은 주파수 안정성 등의 특성을 지닌 고출력, 고효율 레이저 여기의 2차 고조파 고체 레이저의 개발이 빠르게 진행되고 있고, 그 응용성이 한층 부각되고 있다. 레이저 여기 고체레이저^[1-2]는 상준위 수명이 비교적 긴 것을 이용하면 이득 매질이 많은 에너지를 축적할 수 있어 Q-switching을 이용하여 높은 첨두 출력을 갖는 고출력용으로도 효과적으로 사용할 수 있다. 또한 첨두 출력이 크기 때문에 KTP 및 BBO 등의 비선형 결정을 이용한 제2고조파 발생에 의한 단파장화도 효율을 좋게 할 수 있으며, 광파라메트릭 발진(Optical Parametric Oscillation; OPO)과 유도 라만산란(Stimulated Raman Scattering; SRS) 등의 비선형광학 효과를 이용한 파장가변 결맞음 광을 발생시킬 수도 있다.^[3] 이러한 광학적 현상을 잘 실현해주고 있는 Q-switching된 Nd:YAG 레이저는 미세가공, 거리측정, 대기관측 등의 각 분야에서 다양하게 응용되고 있다.^[4]

한편 반도체나 고체 포화 흡수체를 사용한 수동형 Q-switching 기술의 발달은 고가의 음향 광학 변조기(acousto optic modulator) 또는 전기 광학 변조기(electro optic modulator)를 사용하는 능동형 Q-switching에 비해 쉽고 저렴하게 나노 초 영역의 펄스를 발생시킬 수 있는 장점이 있다.^[5-6] 이러한 레이저의 예로서 Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF, 광섬유, Er:YAG, Cr:LiSAF 및 Cr:LiCAF 레이저 등이 있다.^[7] 이득 매질이 Nd:YAG인 경우 수동형 Q-switching에 이용되는 고체 포화 흡수체로는 LiF:F₂ 색 중심 결정이나 Cr⁴⁺:YAG 결정이 주로 사용

된다. Cr⁴⁺:YAG 결정은 레이저 이득 매질의 일종으로 1 μm 근방에 넓은 흡수대가 존재하며 1.35 μm에서 1.60 μm 영역까지 레이저로 발진되는 특성을 가진다. 따라서 Nd:YAG를 이득매질로 하는 레이저 공진기 내에 Cr⁴⁺:YAG 결정을 삽입할 경우 Cr⁴⁺:YAG는 포화 흡수체 역할을 한다. 이러한 고체 포화 흡수체는 종래에 사용되던 색소 포화 흡수체에 비해 손상 문턱(damage threshold)이 높고 별도의 여과 및 순환 장치를 필요로 하지 않아 레이저 장치를 소형화하기 유리하다.

본 연구에서는 연속발진 Ti:sapphire 레이저로 펌핑하는 Nd:YAG 레이저의 출력특성과 Nd:YAG 레이저 공진기 내에 초기 투과율이 90%인 Cr⁴⁺:YAG 포화 흡수체를 설치하여 수동형 Q-switching을 수행하고, Q-switching된 레이저의 평균 출력, 반복률 및 펄스폭 등의 특성을 조사하였다.

II. 수동형 Q-switching 이론

포화 흡수체를 이용한 수동형 Q-switching은 내부에 Q-switching이 일어나는 시간을 조절할 수 있는 장치가 없기 때문에 레이저 매질과 포화 흡수체의 포화 특성에 의해 발진 양상이 좌우되며, Q-switching이 일어나기 위해서는 레이저 매질의 이득 포화(gain saturation)가 일어나기 전에 포화 흡수체 안에서 포화가 일어나야 한다. 그러므로 공진기 안의 포화 흡수체에 입사되는 빛의 면적이 작으면 좋다.^[8] 포화 흡수체를 이용하는 경우 수동형 Q-switching이 일어나기 위한 조건은 다음과 같다.^[9]

$$\frac{\ln(1/T_0^2)}{\ln(1/T_0^2)(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L} \cdot \frac{\sigma_{ss}}{\sigma} \cdot \frac{A}{A_s} > \frac{\gamma}{1-\beta} \quad (1)$$

여기에서 $T_0[\equiv \exp(-n_0 \sigma_{ss} l_s)]$ 는 포화 흡수체의 초기 투과

[†]E-mail: gukim@knut.kumoh.ac.kr

을, l_s 는 포화 흡수체의 두께, R 은 출력 거울의 반사율, σ_{gs} 는 포화 흡수체의 바닥상태에서의 흡수 단면적, σ 는 레이저 매질의 바닥상태에서의 유도 방출 단면적, A/A_s 는 레이저 매질과 포화 흡수체에 입사되는 빔의 면적 비, L 은 공진기 안에서 빛이 왕복하면서 생기는 분산으로 인한 손실, γ 는 밀도 분포 감쇠 변수($\gamma=1, 2$ 는 각각 4 준위, 3 준위 에너지 준위를 갖는 경우에 해당), $\beta = \sigma_{es}/\sigma_{gs}$ 는 포화 흡수체의 바닥상태와 들뜬상태의 흡수 단면적의 비이다.

식 (1)의 A/A_s 항에서 알 수 있듯이 레이저 매질과 포화 흡수체에 입사되는 빔의 단면적이 중요한 역할을 한다. 일반적으로 공진기 안의 빛의 단면적의 크기는 균일하지 않다. 따라서 Cr^{4+} :YAG 결정의 위치에 따라 발진 양상이 달라진다. 그리고 공진기의 구성에 따라서 즉, 같은 길이의 공진기라 하더라도 두 개의 평면 거울을 사용 할 때와 평면-오목, 오목-오목 거울의 공진기 구성에 따라서 내부 빛의 단면적 분포가 달라지므로 공진기 내에서 Cr^{4+} :YAG 결정의 위치가 중요한 변수로 작용한다. 만약 공진기 내부의 빛의 세기가 충분히 강한 경우에는 Cr^{4+} :YAG 결정의 에너지 준위는 아주 빠른 시간 내에 들뜬 상태로 분포가 형성된다. 들뜬 상태에 전자가 머무는 평균수명이 짧기 때문에($\tau_{es} \approx 0.1ns$) Cr^{4+} :YAG 결정을 이용하여 Q-switching된 수동형 모드록킹 펄스를 발진시킬 수도 있다.^[9] 포화 흡수체로 입사되는 빛의 강도는 레이저 매질에 형성되는 초기 밀도 분포 n_i 에 비례하게 되는데 이 밀도는 다음과 같이 주어진다.^[9]

$$n_i = \frac{\ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L}{2\sigma l} \quad (2)$$

여기에서 l 은 레이저 매질의 길이이고, 다른 변수는 각각 식 (1)에서와 같은 의미를 갖는다.

포화 세기 I_s 는 다음과 같이 들뜬 상태에 전자가 머무는 시간 τ_{es} 와 들뜬 상태의 흡수 단면적 σ_{es} 로부터 구할 수 있다.^[9]

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma_{es} \cdot \tau_{es}} \quad (3)$$

Cr^{4+} :YAG 결정의 경우 들뜬 상태에서 $\tau_{es} = 0.1 ns$ 이고, 입사되는 빛의 세기에 따라서 $\sigma_{es} = 2.2 \sim 8 \times 10^{-19} cm^2$ 로 알려져 있다.^[10] 식 (2)에 각 값을 대입해 보면 포화 강도 $I_s = 2.4 \sim 8.6 \times 10^9 W/cm^2$ 값을 갖는다.

III. Cr^{4+} :YAG 결정의 광학적 특성

Cr^{4+} :YAG 결정은 $0.9 \sim 1.2 \mu m$ 의 넓은 흡수 대역폭을 가지고 있다. YAG 결정 격자는 입방체이므로 광학적으로 등방성을 지니고 있다. Cr^{4+} 는 어느 정도 낮은 세기의 빛이 입사될 때에는 광학적으로 등방성인 성질을 보이나, 어느 정도 이상의 세기의 빛이 입사되면 광학적으로 비등방성을 띄게 된다. 또한 YAG를 기판으로 하고 있어서 뛰어난 열전도율, 강한 강도 등 많은 특성을 지니고 있다.^[11]

Cr^{4+} :YAG 결정은 빛의 세기에 따른 투과율에 따라서 발진

되는 레이저 펄스들의 반치폭 및 반복률 등 여러 특성이 달라지며, 투과율은 고정된 값이 아니고 입사되는 빛의 세기에 따라서 변한다. 즉, 초기 투과율 값이 있고, 최대 투과율 값이 있으며 우리가 일반적으로 부르는 투과율은 초기 투과율을 말하는 것이다. 포화 흡수체의 초기 투과율 T_0 와 최대 투과율 T_{max} 는 다음과 같이 주어진다.^[2]

$$T_0 = \exp(-n_0 \sigma_{gs} l_s) \quad (4)$$

$$T_{max} = \exp(-n_0 \sigma_{es} l_s) \quad (5)$$

여기에서, l_s 는 결정의 두께, n_0 는 바닥상태의 밀도, σ_{gs} 는 바닥상태의 흡수 단면적, σ_{es} 는 들뜬상태에서의 흡수 단면적이고, $\sigma_{gs} > \sigma_{es}$ 동안에만 Q-switching이 일어난다.

IV. 실험장치

연속발진 Ti:sapphire 레이저로 펌핑하는 Nd:YAG 레이저를 Cr^{4+} :YAG 결정을 이용하여 Q-switching시키는 실험 장치는 그림 1과 같다. 그림에서 레이저 매질인 Nd:YAG 결정의 한쪽 면은 $1064 nm$ 및 $532 nm$ 파장을 전반사시키고, 펌핑 파장인 $808 nm$ 에서 높은 투과율을 갖도록 코팅하였고, 다른 한쪽 면은 $1064 nm$ 에 대하여 무반사 코팅하였다. Nd:YAG 결정의 지름은 $3 mm$, 길이는 $5 mm$ 이며, 초점거리 $50 mm$ 인 렌즈로 Ti:sapphire 레이저를 집속하여 펌핑하였다. 이때 냉각 효과를 높이기 위해 결정을 인동 박막으로 감싼 후 알루미늄 블록에 고정시켰다. 출력 거울은 $1064 nm$ 에 대한 투과율이 2%인 곡률 반경 $50 mm$ 인 오목 거울을 사용하였다. Nd:YAG 레이저를 Q-switching시키기 위하여 초기 투과율이 90%인 $3 \times 3 \times 1 mm$ 크기의 Cr^{4+} :YAG 포화 흡수체 결정을 공진기 안에 넣었을 때 공진기 길이는 $30 mm$ 이다. 한편 펌핑 레이저인 Ti:sapphire 레이저는 최대 출력 $6W$ 인 Ar 이온 레이저(Coherent, Innova 90-6)를 이용하여 자체 제작한 레이저로 $808 nm$ 에서 $850 mW$ 정도의 출력을 얻을 수 있다.

V. 연속발진 Nd:YAG 레이저 및 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 출력 특성

그림 2는 공진기 내에 Cr^{4+} :YAG 결정이 없을 때 Ti:sapphire

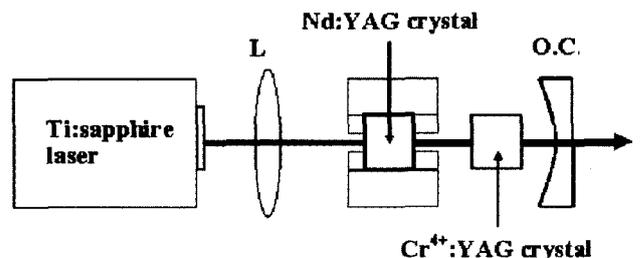


그림 1. 연속 발진 Ti:sapphire 레이저로 펌핑하는 Nd:YAG 레이저 공진기와 Cr^{4+} :YAG 결정을 이용한 수동형 Q-switching 실험 장치.

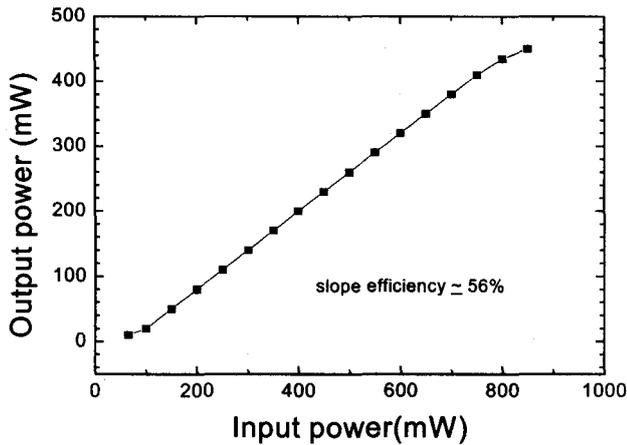


그림 2. Ti:sapphire 레이저 펌핑 출력에 따른 연속발진 Nd:YAG 레이저의 출력 특성.

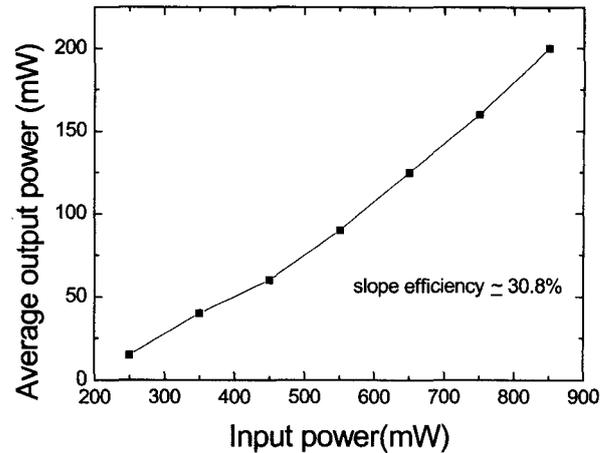


그림 3. Ti:sapphire 레이저 펌핑 출력에 따른 Cr⁴⁺:YAG 포화 흡수체에 의해 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 평균 출력.

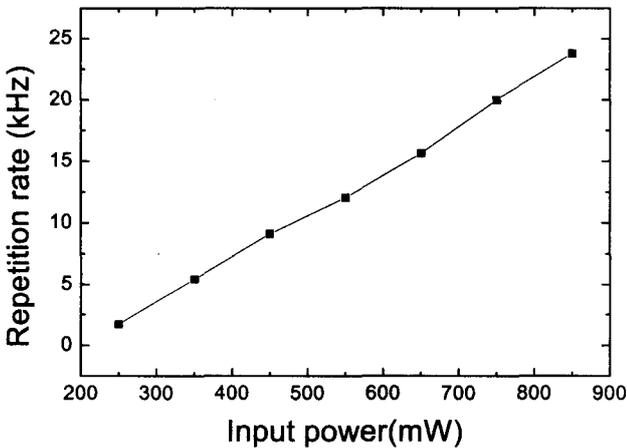


그림 4. Ti:sapphire 레이저 펌핑 출력에 따른 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 반복률.

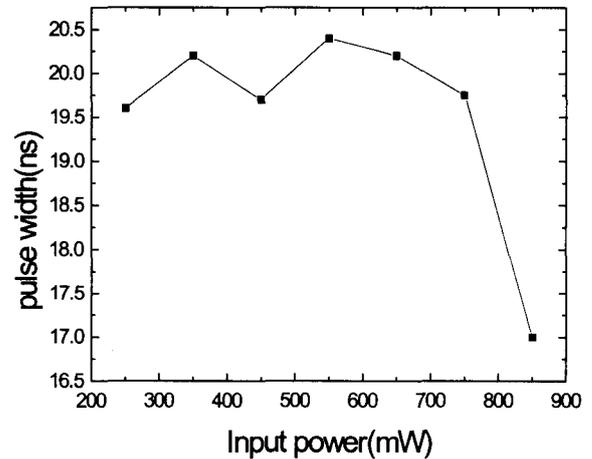


그림 5. Ti:sapphire 레이저 펌핑 출력에 따른 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 펄스폭.

레이저의 펌핑 출력에 따른 연속발진 Nd:YAG 레이저의 출력 특성을 나타낸 것이다. 그림 2와 같이 Nd:YAG 레이저 출력은 Ti:sapphire 레이저의 펌핑 출력이 증가함에 따라 거의 직선적으로 비례하여 커짐을 알 수 있으며, 이때 출력 기울기 효율은 약 56%로 계산되었다.

그림 3은 공진기 내에 Cr⁴⁺:YAG 결정을 삽입하여 수동형 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 출력 특성이다. 그림에서와 같이 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 평균 출력은 Ti:sapphire 레이저의 펌핑 출력이 250 mW일 때 15 mW, 850 mW일 때 200 mW이고, 이때 출력 기울기 효율은 30.8%로 계산되었다. 본 실험에서 사용한 Cr⁴⁺:YAG 포화 흡수체의 낮은 세기 투과율이 높지 않아, 공진기 내부 손실이 증가하여 Q-switching된 레이저의 평균 출력은 전체적으로 감소하였다. 수동형 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 펄스폭 및 반복률은 레이저 공진기 내의 이득 및 사용된 포화 흡수체의 낮은 세기 투과율에 따라 변한다. Q-switching 이론에 의하면 공진기 내의

이득이 크면 펄스폭은 짧아지고 반복률이 증가하며, 포화 흡수체의 낮은 세기 투과율이 높으면 Q-switching이 일어나는 2차 문턱(second threshold)에 도달하는 시간이 짧아져서 반복률이 증가하여 펄스폭은 늘어나고 펄스 당 에너지가 감소하게 된다.^[2] 본 실험에서는 레이저의 펄스폭 및 반복률을 Nd:YAG 결정에 입사되는 펌핑 레이저 출력을 250 mW에서 850 mW까지 변화시키면서 측정하였다. 이때 평균 출력이 최대값을 갖도록 공진기를 정렬하면서 측정하였다.

Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 펄스 반복률과 펄스폭의 측정은 오실로스코프(LeCroy 9350A 500MHz)와 상승 시간이 빠른 광검출기(Electro-Optics, Tech. Inc., ET2000)를 사용하였다. 펌핑 출력에 따른 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 펄스 반복률과 펄스폭 변화를 각각 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 레이저의 펄스폭은 펌핑 출력의 변화에 따라 20.4 ns에서 17.0 ns사이에서 변화하였으며, 레이저 펄스의 반복률은 1.72 kHz에서 23.8 kHz까지 변화하였다.

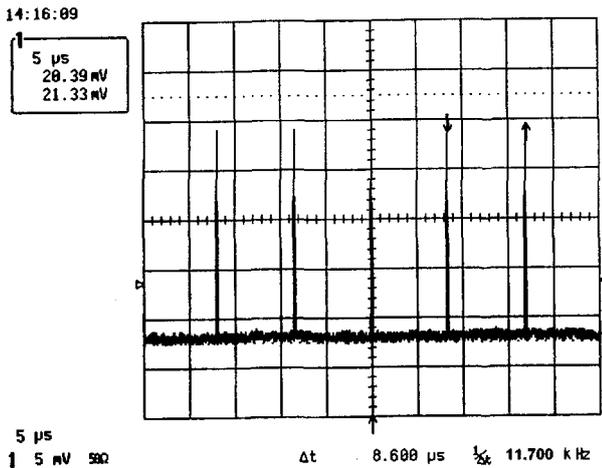


그림 6. Q-switching된 레이저 펄스열.

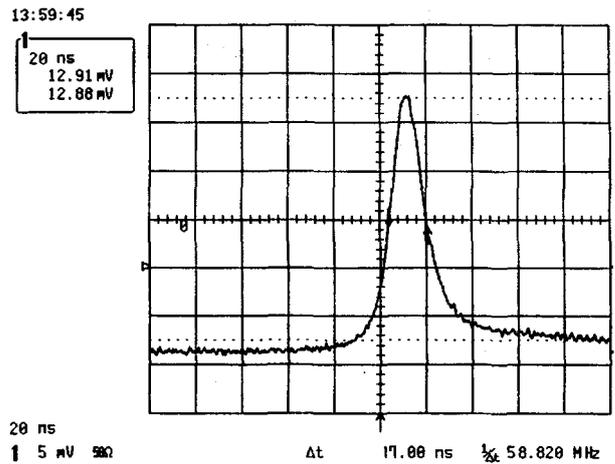


그림 7. Q-switching된 레이저 펄스의 시간적 모양.

그림 6은 11.7 kHz로 동작하는 Q-switching된 레이저 펄스 열의 모양이고, 그림 7은 17.0 ns의 펄스폭을 갖는 Q-switching된 Nd:YAG 레이저 펄스의 시간적 모양이다.

VI. 토의 및 결론

본 연구에서는 Ti:sapphire 레이저로 펌핑하는 연속발진 Nd:YAG 레이저의 출력 특성과 Cr⁴⁺:YAG 결정을 포화 흡수체로 이용하는 수동형 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 평균 출력, 펄스폭 및 반복률 등의 특성을 조사하였다. 그 결과 Nd:YAG 결정을 펌핑하는 Ti:sapphire 레이저의 출력이 850 mW 일 때, 연속 발진 Nd:YAG 레이저의 출력이 450 mW로 측정되어 출력 기울기 효율이 약 56%로 계산되었다. 또한, 초기 투과율이 90%인 Cr⁴⁺:YAG 결정을 이용하여 수동형 Q-switching 시킨 Nd:YAG 레이저 출력이 200 mW로 측정되었고, 이때의 펄스 반복률 및 펄스폭은 각각 23.8 kHz 및 17.0 ns로 측정되었다.

본 연구에서의 결과 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 평균 출력 및 펄스 반복률이 약간 불안정하였다. 이는 레이저 매질인 Nd:YAG 결정과 포화 흡수체로 사용된 Cr⁴⁺:YAG 결정에서 발생한 열에 의한 출력 요동과 레이저 자체의 혼돈적 특징에 의해서 발생한 것으로 보인다. 따라서 레이저 펄스의 세기 및 반복률을 안정시키기 위해서는 Nd:YAG 및 Cr⁴⁺:YAG 결정의 온도 안정화와 수동형 Q-switching 이론 연구를 통하여 레이저 출력의 혼돈 현상을 이해하고 최적의 안정적 레이저 동작 조건을 찾는 등의 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행한 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. Basu and R. L. Byer, "Average power limits of diode-laser-pumped solid state lasers", *Appl. Opt.* vol. 29, no.12, 1765-1771, 1990.
- [2] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*(Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1999), pp. 507-514.
- [3] 김병태, 김태석, "반도체 레이저 단면 여기 고체레이저에서의 최적 공진조건에 관한 해석," *한국광학회지* 8(4), 303-307, 1997.
- [4] 정태문, 김광석, 문희중, 이종훈, 김철중, 이종민, "Cr⁴⁺:YAG 포화흡수체를 이용한 레이저 다이오드 뒷면 여기 Nd:YAG 레이저의 들뜸 효율 및 Q-switching 특성 연구," *한국광학회지*, vol. 9, no. 4, 231-235, 1998.
- [5] T. T. Kajava and A. L. Geata, "Q-switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with GaAs," *Opt. Lett.* vol. 21, no. 16, 1244-1246, 1996.
- [6] A. Agnesi, S. Dell'Acqua, and G. C. Reali, "Design and characterization of a diode-pumped, single longitudinal and transverse mode, intracavity-doubled cw Nd:YAG laser," *Appl. Opt.* vol. 36, no. 3, 597-601, 1997.
- [7] 광노민, 박종대, 조창호, 임용식, 노영철, 이재형, 장준성, "반도체 레이저 여기 팜토초 Cr:LiSAF 레이저," *한국광학회지*, vol. 11, no. 5, 360-364, 2000.
- [8] Yung-Fu Chen, Y.P. Lan, and S. C. Wang, "Efficient high-power diode-end-pumped TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser with a planer cavity," *Opt. Lett.* vol. 25, no. 14, 1016-1018, 2000.
- [9] Yung-Fu 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. 9, 1442-1444, 2000.
- [10] Y. Shimony, Z. Burstein, and Y. Kalisky, "Cr⁴⁺:YAG as Passive Q-Switch and Brewster Plate in a Pulsed Nd:YAG Laser", *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 31, no. 10, 1738-1741, 1995.

- [11] N.N. Il'ichev, A.V. Kir'yanov, and P.P. Pashinin, "Model of passive Q switching taking account of the anisotropy of nonlinear absorption in a crystal switch with phototropic centres," *Quantum Electronics* vol. 28, no. 2, 147-151, 1998.

Characteristics of Nd:YAG Laser Pumped by cw Ti:sapphire Laser and Its Passive Q-switching with Cr⁴⁺:YAG as Saturable Absorber

Beum-Su Ahn, Han Tae Choo, and Gyu Ug Kim[†]

School of Natural Science, Kumoh National Institute of Technology, Kyungbuk, 730-701, KOREA

[†]*E-mail: gukim@kmut.kumoh.ac.kr*

(Received March 22, 2004, Revised manuscript May 10, 2004)

We have investigated the characteristics of a Nd:YAG laser pumped by a cw Ti:sapphire laser. When the pumping power of the Ti:sapphire laser was 850 mW, the maximum output power of the Nd:YAG laser was 450 mW. As a result, the slope efficiency for the output power of the Nd:YAG laser was measured to be 56%. We have also investigated the characteristics of a passively Q-switched Nd:YAG laser by using a Cr⁴⁺:YAG as saturable absorber with initial transmission of 90%. The maximum average output power of 200 mW was obtained with repetition rate of 23.8 kHz and pulse width of 17.0 ns.

OCIS Codes : 140.3530, 140.3540.