

연속 발진 다이오드 레이저로 여기된 수동형 Q-스위치 Nd:YVO₄ 레이저의 출력 펄스 안정화

안승인 · 박윤배

경북대학교 과학교육학과
Ⓢ 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지

여환섭 · 이준호

경산과학고등학교
Ⓢ 712-260 경북 경산시 갑제동 440-6번지

이강인 · 이종훈[†]

영남대학교 물리학과
Ⓢ 712-749 경북 경산시 대동 214-1번지

(2009년 9월 7일 받음, 2009년 9월 30일 수정본 받음, 2009년 9월 30일 게재 확정)

Cr:YAG 결정을 포화흡수체로 사용하여 수동형 Q-스위치시킨 다이오드 레이저 여기 Nd:YVO₄ 레이저를 제작하였다. Cr:YAG 결정의 한 면에 여기 빛 파장(808 nm)에 대해 고반사 코팅을 한 후, Nd:YVO₄ 결정과 접촉시켜 공진기를 구성하였다. Cr:YAG의 한 면에 여기 다이오드 레이저를 반사시키는 코팅을 입혀 공진기의 광변환 효율을 높임과 동시에, 여기빔에 의한 포화흡수체의 표백현상을 방지하여 안정된 출력이 나오게 하였다. 레이저 이득 매질 및 포화흡수체의 온도는 열전 냉각기와 냉각수를 사용하여 안정화 시켰다. 온도안정화를 시킨 상태에서 발진되는 펄스의 첨두 출력 요동(peak to peak)은 4%였다. 다이오드 레이저의 출력이 1 W일 때, 출력 펄스의 반복률은 평균 9 KHz 였으며, 최소 펄스폭은 7.11 ns, 최고 출력은 16.27 mW였다.

Stabilization of Output Pulses from a Passively Q-switched Nd:YVO₄ Laser Pumped by a Continuous-wave Laser Diode

Seungin Ahn and Yunebae Park

Department of Science Education, Kyungpook National University, 1370 Sankyuk-dong, Buk-gu, Deagu 702-701, Korea

Hwanseop Yeo and Joonho Lee

Gyeongsan Science High School 440-6 Gabje-dong, Gyeongsan 712-749, Korea

Kangin Lee and Jonghoon Yi[†]

Department of Physics, Yeungnam University, 214-1 Dae-dong, Gyeongsan 712-749, Korea

[†]E-mail: jhyi@yu.ac.kr

(Received September 7, 2009; Revised manuscript September 30, 2009; Accepted September 30, 2009)

A Cr:YAG crystal was used as a saturable absorber for passive Q-switching of a Nd:YVO₄ laser which was pumped by a 1-W continuous wave laser diode. The first surface of the Cr:YAG was high-reflection coated for the pump wavelength. The high-reflection coating improved the absorption efficiency of the pump beam in the Nd:YVO₄ through double pass absorption. It also prevented pump beam induced partial bleaching of the Cr:YAG. The peak-to-peak pulse fluctuation of passively Q-switched laser output was approximately 4 %. The minimum pulse-width was measured to be 7.11 ns. Also, the average pulse repetition rate was 9 kHz and the maximum output power was 16.27 mW.

[†]E-mail: jhyi@yu.ac.kr

Keywords: Passive Q-switching, Pulsed laser, Diode-pumped, Solid-state laser, Cr:YAG

OCIS codes: (140.3480) Lasers, diode-pumped; (140.3540) Lasers, Q-switched; (140.3538) Lasers, pulsed; (140.2020) Diode lasers

I. 서 론

수동형 Q-스위칭 레이저는 구조가 단순하고, Q-스위칭을 위해 외부의 전원장치가 필요 없는 장점이 있다.^[1-3] 또한, 공진기 길이를 짧게 하면 나노 초 이하의 펄스 출력이 가능하며, 공진기 내부의 포화흡수체가 작은 개구(aperture) 역할을 하므로 출력 빔의 질이 우수하다.^[4, 5] 하지만, 수동형 Q-스위칭 레이저는 출력의 요동이 심하여 응용의 확대에 걸림돌이 되고 있다. 포화흡수체로는 SESAM(semiconductor saturable-absorber mirror), Cr 도핑된 YAG 결정, 분자 빔 성장(MBE : molecular beam epitaxy)으로 Cr 박막을 표면에 입힌 Nd 또는 Yb로 도핑된 YAG, YVO₄, KGd(WO₄)₂ 결정 등을 고체레이저 공진기에 삽입하거나 레이저 결정과 접합하여 구성한다.^[1]

최근 수년간 수동형 Q-스위칭 레이저의 펄스 출력 안정화에 대한 연구가 지속적으로 진행되었으며^[6, 7], 최근 몇몇 그룹에서 안정된 펄스 출력을 구한 결과를 보고하고 있다. 하지만, 이들 방법에서는 외부 조절에 의한 펄스 여기^[6, 7], 공진기 외부에 조절 광원을 두는 방법^[8] 등을 사용하여 포화흡수체 자체 Q-스위칭에 대한 장점을 살리지 못하고, 광학계의 구조가 복잡하다.

본 연구에서는 출력이 1 W인 연속발진(CW) 레이저 다이오드를 이용하여 단면 여기 수동형 Q-스위칭 Nd:YVO₄ 레이저를 제작하였다. 포화흡수체로는 Cr:YAG를 사용하였다. 먼저, 양면에 1064 nm에 대하여 무반사 코팅이 된 Cr:YAG 결정을 사용하여 출력 특성을 측정하였다. 다음으로 포화흡수체 앞면에 여기 다이오드 파장에 대해 전반사 코팅된 Cr:YAG를 이용하여 Nd:YVO₄ 결정에 인접하게 접촉시켜 공진기를 구성하였다. Cr:YAG 결정의 앞면에서 여기빔을 반사시킴으로 Cr:YAG에서 여기빔이 흡수되는 것에 의한 표백 현상을 방지하였다. 또한 여기빔이 Nd:YVO₄ 결정에 재흡수되며, 두 결정 사이에 공간이 없어 공기 흐름에 따른 출력 손실도 방지되어 광변환 효율도 상승되었다. 여기빔 파장에 대해 한 면이 전반사 코팅된 Cr:YAG를 이용한 결과 안정된 펄스 출력을 얻었다. Nd:YVO₄와 Cr:YAG의 온도 안정화를 통해 출력 요동이 더욱 감소되었다.

II. 실험 및 결과

레이저의 구조는 그림 1에 나와 있다. 이득 매질로 3×3×1 mm³ 크기의 1 at.% Nd를 도핑한 YVO₄ 결정을 사용하였다. Nd:YVO₄의 앞면은 1064 nm 레이저 빛에 대해 전반사, 808 nm 레이저 빛에 대해서는 투과율 80 % 이상이 되도록 이색 유전체 코팅을 하였으며, 뒷면은 1064 nm에 대하여 무반사 코팅을 하였다. 1 W 출력의 여기빔에 대해 0.31 W가 YVO₄

결정을 투과하였으며, 이로부터 계산한 흡수계수는 $\alpha = 1.17/\text{mm}$ 이었다. 포화흡수체는 크기가 3×3×2 mm³이며, 초기 투과율이 80 %인 Cr:YAG를 이용하였다. Cr:YAG는 두가지 종류를 사용하여 출력을 비교하였다. 먼저 그림 1(a)와 같이 양면이 1064 nm 레이저 빛에 대해 무반사 코팅된 Cr:YAG를 사용하여 출력을 측정하였다. 다음, 그림 1(b)와 같이 앞면은 808 nm 레이저 빛을 반사하면서 동시에 1064 nm 레이저 빛에 대해 무반사하는 코팅이 되어있고, 뒷면은 1064 nm 레이저에 대해 68 % 부분 반사하는 박막이 입혀진 Cr:YAG를 사용하였다. 이 Cr:YAG 결정의 초기투과율도 80 %이다. Cr:YAG는 Nd:YVO₄ 결정의 뒷면에 접촉하게 두었다. 광검출 장치로는 실리콘 광다이오드(상승시간 = 1 ns, DET 210, Thorlab사)를, 계측 장비로는 대역폭이 300 MHz인 디지털 오실로스코프(TDS3032, Tektronics사)를 사용하였다.

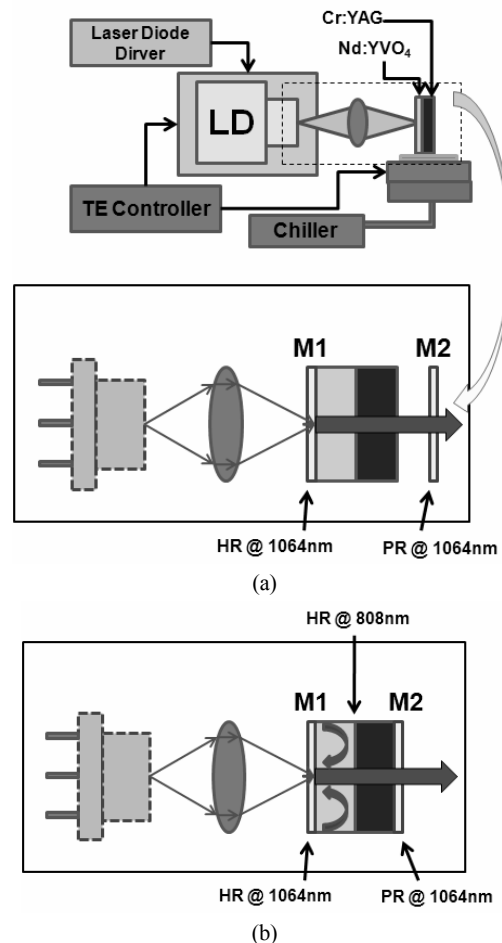


FIG. 1. Schematic diagram of a passively Q-switched Nd:YVO₄ laser and experimental setup. (a) cavity employing anti-reflection coated Cr:YAG crystal (cavity length = 12 mm). (b) cavity employing high-reflection coated Cr:YAG crystal (cavity length = 3 mm).

인접한 Nd:YVO₄와 Cr:YAG 결정은 얇은 인듐(indium) 금속박으로 감싼 후 구리로 만든 마운트 내부에 삽입하여 고정하였다. 이 구리 재질의 마운트 하단에는 냉각수 순환 장치와 열전냉각기(thermoelectric cooler, TEC)를 장착하여 Nd:YVO₄와 Cr:YAG의 온도를 일정하게 유지 시켰다.

Nd:YVO₄를 여기하는 연속발진 다이오드(Sony, 파장=808 nm)는 TO캔 형태를 가졌으며 최대 출력이 1 W이다. 다이오드 레이저는 냉각장치가 일체화된 전용 마운트(Thorlab)에 장착되었으며, 마운트에 내장된 열전냉각기를 이용하여 온도를 21°C로 유지하였다. 레이저 다이오드에서 나온 빔은 수직 방향으로 약 30°, 수평 방향으로 약 10° 각도로 확산되며, 이 빔은 초점거리가 약 10 mm인 비구면 렌즈쌍(aspheric lens pairs)에 의해 렌즈로부터 약 10 mm 떨어진 Nd:YVO₄ 결정 표면에 집속된다.

다이오드 레이저 빔에 의한 Cr:YAG의 부분 표백현상이 수동형 Q-스위칭 Nd:YVO₄ 레이저에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 먼저 무반사 코팅된 Cr:YAG를 사용한 레이저의 특성을 측정하였다. 레이저의 출력경은 출력경이 코팅된 Cr:YAG를 이용한 경우와 비교하기 위하여 반사율이 75 %로 근접한 평면경을 사용하였고, 공진기의 길이는 12 mm이다. Nd:YVO₄와 Cr:YAG의 온도를 21°C로 안정화 시킨 상태에서, 레이저 다이오드의 출력이 1 W일 때 Q-스위칭된 펄스를 얻었다. 그림 2에서 보듯 레이저의 평균 출력은 8.2 mW이었으며, 펄스폭은 29.3 ns, 펄스 반복률은 407 kHz였다. 레이저 펄스 침투 출력의 요동은 약 36 %이었다.

다음, 그림 1(b)와 같이 여기 파장의 레이저를 반사하는 코팅이 된 Cr:YAG를 이용한 Nd:YVO₄ 레이저를 제작하였다. Nd:YVO₄와 Cr:YAG 경계면에 여기빔 반사 코팅을 하여, 경계 면에서의 여기빔 반사를 통해 재흡수를 유도하고 광변환 효율의 증가와 여기빔에 의한 Nd:YVO₄ 결정의 열 분포를 고르게 하여 열에 의한 종모드 요동을 최소화하고자 시도하였다. 그리고 포화흡수체로 흡수되는 여기빔을 감소시켜 여기빔에 의한 포화흡수체의 표백현상을 막았다. Nd:YVO₄와

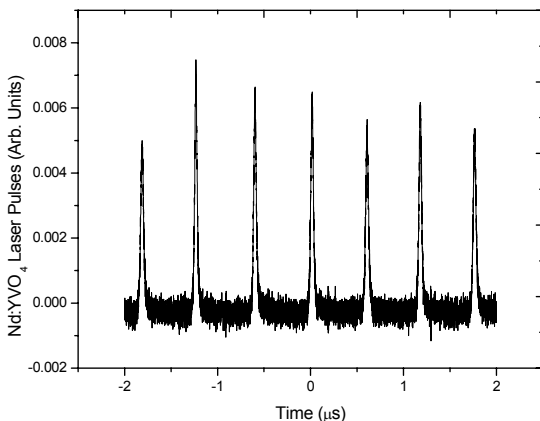
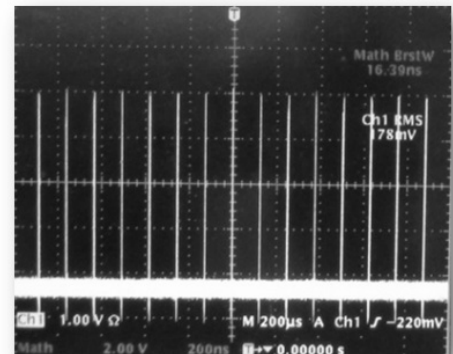
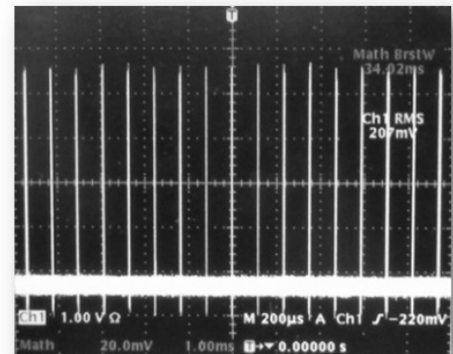


FIG. 2. Temporal profiles of passively Q-switched Nd:YVO₄ laser output pulses (laser diode output power = 1 W, output coupler reflectance = 75 %, cavity length = 12 mm).

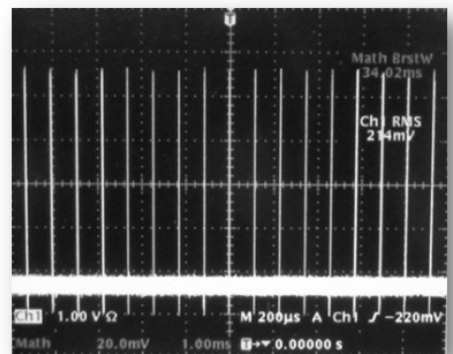
Cr:YAG 결정을 접촉하여 구성된 공진기 전체 길이는 3 mm이다. 두 결정의 온도를 21°C로 유지 시킨 후 여기빔의 출력이 1 W인 때 펄스 출력 특성을 살펴보았다. Nd:YVO₄ 펄스 반복률과 출력 요동은 여기빔이 레이저 결정에 입사한 위치에 따라 민감하게 변화였다. 펄스반복률이 9 KHz 내외가 되면 요동이 감소하며 안정된 펄스출력을 보였다. 그림 3은 측정 결과를 보여주며 펄스 시간폭은 11.23 ns, 반복률은 8.7 KHz 이었다. 한 시간 동안 출력 변화를 측정한 결과, 출력 요동은 약 4%였다. 최고출력은 14.3 mW이며 광변환 효율이



(a)



(b)



(c)

FIG. 3. The temporal profiles of passively Q-switched Nd:YVO₄ laser pulses as a function of the crystal temperature (laser diode output power = 1 W, reflectance of output coupler = 68 %, cavity length = 3 mm). (a) crystal temperature = 20°C (b) crystal temperature = 22°C (c) crystal temperature = 24°C.

1.4%로, 무반사 코팅된 Cr:YAG를 삽입하여 공기에 노출된 경우 보다 효율이 1.8배 올라갔다. 레이저가 발진 문턱 근처에서 발진하고 있으므로 투과한 0.31 W를 되반사하여 여기에 사용하고, 공진기의 길이가 짧아서 손실이 감소하여 출력이 상승하였다. 수동형 Q-스위칭에 사용된 Cr:YAG 결정에서의 흡수로 인하여 발진 효율이 감소하였으며, 본 연구에서의 결과는 타 연구에서의 효율과 비슷하다.^[4]

다이오드 레이저의 출력을 1 W로 고정시킨 후, 두 결정의 온도를 18°C에서 30°C로 1°C 간격으로 바꾸어 가며 펄스 출력 특성을 살펴보았다. 결정의 온도가 변하는 동안에는 펄스 출력은 요동하지만, 일정한 온도로 안정화된 이후에는 3~4% 사이의 요동을 가진 안정된 펄스 출력을 보였다. 그림 4(a)에서 보듯 각 온도에 따라 수동형 Q-스위칭된 펄스 출력 세기가 조금씩 변하며, 25°C에서 펄스 평균 최고 출력 16.27 mW 이었다. 펄스반복률은 온도에 따른 변화가 거의 없이 평균 9 KHz 정도였으며, 25°C 이후 펄스반복률이 감소하였다. 출력 펄스 시간폭은 반복률 경우보다 온도에 따른 변화

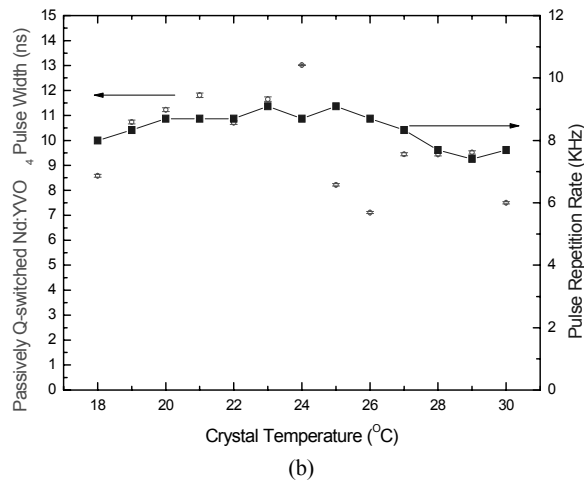
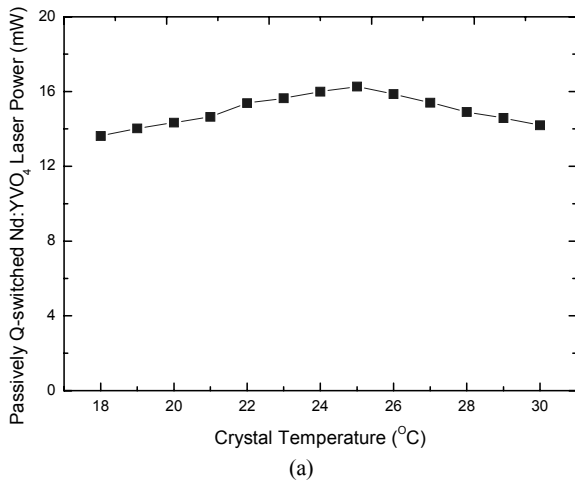


FIG. 4. The pulse characteristics as a function of the crystal temperature (laser diode output power = 1 W, reflectance of output coupler = 68 %, cavity length = 3 mm). (a) average output power (b) pulse width and pulse repetition rate.

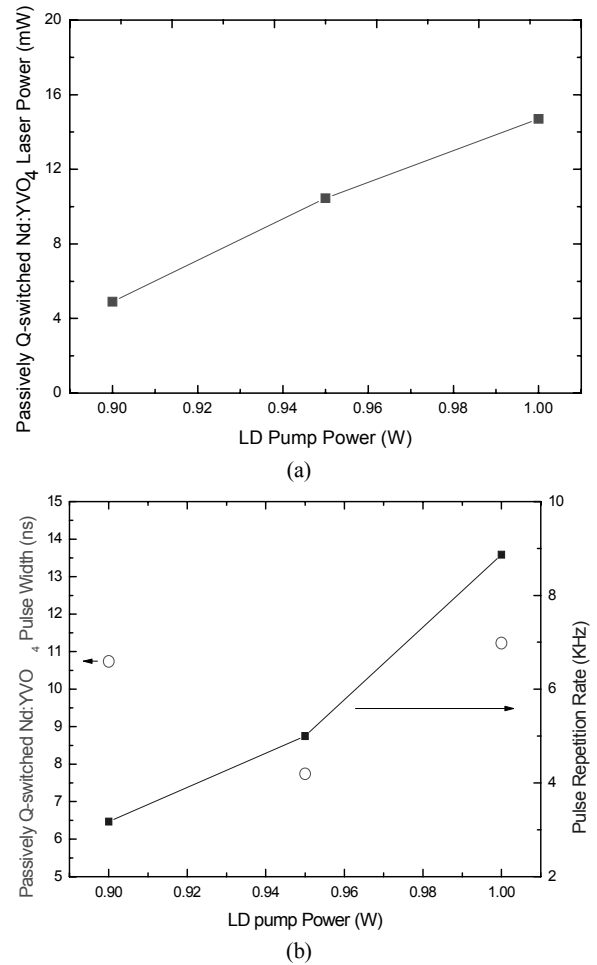


FIG. 5. The variation of the pulse characteristics as a function of the laser diode pump power (crystal temperature = 20°C, reflectance of output coupler = 68 %, cavity length = 3 mm). (a) average output power (b) pulse width and pulse repetition rate.

가 크게 변화였다. 그림 4(b)에서 보듯 26°C에서 7.1 ns의 가장 짧은 펄스 시간폭을 보였다. 측정된 펄스폭의 경우 광검출기가 포화되어 측정되어, 실제 펄스폭은 이보다 더 짧게 측정될 수 있다. 이 때 침투 출력은 0.21 MW 이었다.

두 결정의 온도를 20°C로 고정시킨 후, 여기빔의 출력을 0.05 W씩 올라가며 레이저 다이오드 출력에 따른 펄스 출력 특성을 살펴보았다. 두 결정의 온도가 고정된 상태에서 여기빔의 출력을 변화시킬 경우, 수동형 Nd:YVO₄ 레이저의 평균 출력만 변할 뿐, 펄스 출력 요동은 4% 정도로 안정되었다. 출력경과 Cr:YAG 사이의 공기 유동을 없애고, 여기 다이오드 레이저가 Cr:YAG에 미치는 영향을 감소시킨 결과 요동이 감소한 것으로 생각된다. 그림 5에서 보듯 여기빔의 출력이 0.9 W일 때, 수동형 Q-스위칭 Nd:YVO₄ 레이저가 발진하였다. 이 때 레이저 평균 출력은 4.9 mW 이었다. 여기빔 출력을 증가시켜, Nd:YVO₄ 레이저의 출력도 높아졌다. 또한 펄스반복률도 여기빔 출력이 0.9 W일 때, 3.2 KHz로 가장 낮았지만, 출력이 올라감에 따라 8.7 KHz까지 증가하였다.

III. 결 론

레이저 다이오드로 단면 여기하는 수동형 Q-스위칭된 Nd:YVO₄ 레이저를 제작하였다. 공진기 내부에 Cr:YAG 결정을 두어 포화흡수체로 이용하였다. 먼저, 양면이 1064 nm에 대하여 무반사 코팅된 Cr:YAG를 사용한 공진기를 구성하였다. 결정의 온도가 21℃이고 여기 다이오드 출력이 1 W일 때 출력은 8.2 mW이며, 펄스 출력 요동이 36 %이었다.

Nd:YVO₄의 여기 효율을 올리고, 여기광에 의한 Cr:YAG의 표백 현상을 방지하기 위해 앞면은 여기 다이오드 레이저 파장(808 nm)에 대해 전반사 코팅을 하고, 뒷면은 공진 레이저 파장(1064 nm)에 대해 부분반사 코팅된 Cr:YAG를 이용하였다. 뒷면은 출력경으로 사용하여 출력경과 Cr:YAG 결정 사이의 공기 흐름에 의한 출력 변화를 감소시켰다. 결정의 온도가 21℃이고 여기 레이저 출력이 1 W일 때 Q-스위칭된 레이저 출력은 14.3 mW이었으며, 결정의 온도가 25℃에서 최고 레이저 출력 16.27 mW 얻었다. 여기 레이저의 반사와 함께 결정의 온도를 안정화시켜서 출력 요동을 약 4 % 정도로 감소시켰다.

감사의 글

본 연구는 2009학년도 경상북도교육청(미래과학자양성프로그램) 지원으로 수행되었음.

References

1. J. Dong, K.-I. Ueda, Y. Hideki, and A. A. Kaminskii, "Laser-diode pumped self-Q-switched microchip lasers," *Optical Review* **15**, 57-74 (2008).
2. J. Li, J. Dong, M. Mitsurua, A. Shirakawa, and K.-I. Ueda, "Transient temperature profile in the gain medium of CW- and end-pumped passively Q-switched microchip laser," *Opt. Comm.* **270**, 63-67 (2002).
3. Y. Kalisky, C. Labbe, K. Waichman, L. Kravchik, U. Rachum, P. Deng, J. Xu, J. Dong, and W. Chen, "Passively Q-switched diode-pumped Yb:YAG laser using Cr⁴⁺-doped garnets," *Optical Materials* **19**, 403-413 (2002).
4. Y. Kalisky, "Cr⁴⁺-doped crystals: their use as lasers and passive Q-switches," *Progress in Quantum Electronics* **28**, 249-303 (2004).
5. N. Pavel, J. Saikawa, S. Kurimura, and T. Taira, "High average power diode end-pumped composite Nd:YAG laser passively Q-switched by Cr⁴⁺:YAG saturable absorber," *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 1253-1259 (2001).
6. M. Tsunekne, T. Inohara, A. Ando, K. Kanehara, and T. Taira, "High peak power, passively Q-switched Cr:YAG/Nd:YAG micro-laser for ignition of engine," in *Proc. Advanced Solid-State Photonics* (Nara, Japan, Jan. 2008), MB4.
7. M. Tsunekne, T. Inohara, A. Ando, K. Kanehara, and T. Taira, "Compact, high peak power, passively Q-switched micro-laser for ignition of engines," in *Proc. CLEO/QELS* (San Jose, California, USA, May 2008), CFJ4.
8. B. Cole, L. Goldberg, C. W. Trussell, A. Hays, B. W. Schilling, and C. McIntosh, "Reduction of timing jitter in a Q-switched Nd:YAG laser by direct bleaching of a Cr⁴⁺:YAG saturable absorber," *Opt. Exp.* **17**, 1766-1771 (2009).