

Cr⁴⁺:YAG 포화 흡수체를 이용한 레이저 다이오드 뒷면 여기 Nd:YAG 레이저의 들뜸 효율 및 Q-switching 특성 연구

정태문 · 김광석 · 문희종 · 이종훈 · 김철중 · 이종민

한국원자력연구소 기반기술개발단, 대전 305-600

(1998년 5월 29일 받음, 1998년 7월 8일 수정본 받음)

레이저 다이오드 뒷면 여기 방식을 이용한 Nd:YAG 레이저를 제작하고, 뒷면 여기 방식을 이용하였을 때, 들뜸 효율을 측정하였다. 포화 흡수체로 Cr⁴⁺:YAG를 레이저 공진기 내부에 설치하여 수동형 Q-switching을 수행하였고, 그 때, 평균 출력, 펄스폭 및 반복율 특성등을 조사하였다. 수동형 Q-switching된 레이저의 펄스폭 및 반복율은 평균 출력 및 Cr⁴⁺:YAG결정의 낮은 강도 투과율(low intensity transmission)에 따라 변화하였으며, 평균 출력은 최고 1 W, 펄스폭은 최저 51 nsec까지 얻을 수 있었고 최고 약 40 kHz의 고반복율로 동작하는 것을 관찰하였다.

1. 서 론

Q-switching된 Nd:YAG 레이저는 미세가공, 거리측정, 대기 관측등에 중요한 도구로 사용될 수 있다. 최근 반도체나 고체 포화 흡수체를 이용한 수동형 Q-switching 기술의 발달은 음향 광학 변조기(Acousto-Optic modulator)나 전기 광학 변조기(Electro-Optic modulator)를 사용하는 능동형 Q-switching에 비해 쉽고 저렴하게 나노초 영역의 펄스를 생성할 수 있게 해주고 있다.^[1,2] Nd:YAG가 이득 매질인 경우 수동형 Q-switch로 이용되는 고체 포화 흡수체로는 LiF:F₂⁻색 중심 결정[3]이나 Cr⁴⁺:YAG 결정이 주로 사용된다. Cr⁴⁺:YAG는 레이저 이득 매질의 일종으로 1 μm근방에 넓은 흡수대가 존재하며 1.35 μm에서 1.6 μm영역까지 레이저로 발진되는 특성을 가진다.^[4,5] 따라서, Nd:YAG를 이득 매질로 하는 레이저 공진기내에 Cr⁴⁺:YAG 결정을 설치할 경우 Cr⁴⁺:YAG는 포화 흡수체 역할을 한다. 이러한 고체 포화 흡수체는 종래에 사용되던 dye 포화 흡수체에 비해 손상 문턱(damage threshold)이 높고 별도의 여과 및 순환 장치를 필요로 하지 않아 레이저 장치를 소형화하기에 유리하다.

한편, 레이저 다이오드 기술의 발달은 수 W이상의 큰 출력을 갖는 여기용 레이저를 저렴한 가격으로 공급하는 것을 가능하게 해 주었고 이에 따라 레이저 다이오드로 여기되는 고체 레이저, 즉 완전 고체 레이저를 실현시켜 주었다.^[6,7] 완전 고체 레이저는 레이저 장치의 소형화, 반 영구적인 수명 및 유지의 용이함등으로 인하여 현재 많이 제작되어 사용되고 있는 실정이다. 특히, 레이저 다이오드 뒷면 여기 방법을 이용할 경우 이득 매질의 흡수 파장에 여기빔의 파장을 일치시킬 수 있을 뿐만 아니라, 이득 매질에 직접적으로 여기하기 때문에 높은 여기 효율을 얻을 수 있고, 이득 매질의 이득 부피와 기본 모드를 잘 일치시킬 수 있어 출력빔 질을 좋은 상태로 유지할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 레이저 다이오드 뒷면 여기 Nd:YAG 레이저를 제작하고, 레이저 다이오드 뒷면 여기시 레이저 여기 구조

의 성능 평가에서 중요한 변수가 되는 들뜸 효율(excitation efficiency)을 측정하였다. 레이저 다이오드 뒷면 여기시 들뜸 효율은 단지 여기빔이 이득 매질에 흡수된 양을 측정함으로써 간단히 구할 수 있었다. 또한, 레이저 다이오드 뒷면 여기 Nd:YAG 레이저 공진기내에 포화흡수체로 Cr⁴⁺:YAG 결정을 설치하여 수동형 Q-switching을 수행하였고, Q-switching된 레이저의 평균 출력, 펄스폭 및 반복율 특성등을 조사하였다.

2. 레이저 다이오드 뒷면 여기시 들뜸 효율

레이저 제작시 들뜸 효율은 레이저의 성능을 평가하는 중요한 고려 요인이다. 이러한 들뜸 효율은 광여기에 의해 레이저 붕에 전달되는 에너지중 윗준위 상태밀도에 의해 표현되는 에너지의 비로 계산된다. Findlay와 Clay의 모델에 의하면 레이저 공진기의 손실 L 은 출력력의 반사율을 달리하면서 측정할 문턱 여기 출력 P_{th} 을 구함으로써 다음과 같이 표현된다.^[8]

$$-\ln R = 2KP_{th} - L \quad (1)$$

이 때, 기울기 $2K$ 는

$$2K = \gamma\tau N_0\sigma l \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 여기서, τ 는 윗준위 수명, N_0 는 단위 부피당 active ion의 수, σ 는 유도 천이 단면적, l 은 이득 매질의 길이이다. γ 는 문턱에서의 여기율(W_{th})과 문턱 여기 출력(P_{th})의 비로 주어지고, 문턱에서의 여기율은 $N_{th}/N_0\tau$ 이므로 γ 는

$$\gamma = \frac{W_{th}}{P_{th}} = \frac{N_{th}}{P_{th}N_0\tau} \quad (3)$$

와 같이 표현된다. 이 때, 들뜸 효율 η_{excit} 은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\eta_{excit} = 2K \frac{h\nu A}{\tau\sigma} \quad (4)$$

여기서, A 는 이득 매질의 단면적이다. 이러한 방식으로 측정

하는 들뜸 효율(η_{excit})은 섬광등 여기 방식^[9]이나 레이저 다이오드 여기의 경우 측면 여기 방식^[10]에서 주로 사용되고 있으며, 그 경우 (4)식에서 알 수 있듯이 기울기 2K를 측정함으로써 쉽게 들뜸 효율을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 레이저 다이오드로 이득 매질의 뒷면을 여기하였을 때, 들뜸 효율을 측정하는 방법을 처음으로 제안하였다. 레이저 다이오드 뒷면 여기 방식의 경우 레이저 붐의 여기 단면적이 레이저 붐의 길이 방향으로 변화하고 있으므로 γ 는 레이저 붐의 반경 방향 r 과 길이 방향 z 의 함수로 표현되며, 이 때 문턱 들뜸 효율을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_{excit} = N_0 \int_V \chi(r, z) dV, \quad \chi(r, z) = \frac{N_{th}(r, z)}{P_{th} N_0 \tau} \quad (5)$$

여기서, 적분은 여기되는 레이저 붐의 체적 적분을 의미한다. 이 때, $N_{th}(r, z)$ 는 레이저 붐에 흡수되는 출력과 다음과 같은 관계가 있다.

$$N_{th}(r, z) = \frac{\tau P_f(r, z)}{h\nu} = \frac{\tau \eta_u P_{abs}(r, z)}{h\nu} \quad (6)$$

여기서, $P_f(r, z)$ 는 단위 부피당 형광 출력, $P_{abs}(r, z)$ 는 단위 부피당 레이저 붐에 흡수되는 출력, η_u 는 양자효율(quantum efficiency, η_q)과 스톡스 인자(Stokes factor, η_s)의 곱으로 주어지는 윗준위 효율(upper state efficiency)로, 일반적으로 808 nm 레이저 다이오드로 여기하고 1064 nm로 발진할 경우 양자효율은 0.95, 스톡스 인자는 0.75이므로, 윗준위 효율 η_u 는 0.72로 주어진다. 따라서, 문턱 들뜸 효율은 다음과 같은 간단한 식으로 표현된다.

$$\eta_{excit} = \frac{\eta_u}{P_{th}} \int_V P_{abs}(r, z) dV \quad (7)$$

따라서, 레이저 다이오드로 레이저 붐의 뒷면을 여기할 경우 여기광이 레이저 붐에서 흡수된 양만을 측정하면 들뜸 효율을 간단히 측정할 수 있다.

3. 레이저 다이오드 여기 Nd:YAG 수동형 Q-switching 레이저

레이저 다이오드로 여기되는 Nd:YAG 레이저의 장치도는 그림 1과 같다. 레이저 다이오드로 여기되는 Nd:YAG 레이저는 1.064 μm 에서 전반사 810 nm에서 높은 투과율을 갖는 전반사경, Nd:YAG 이득 매질, Glan 편광기, Cr⁴⁺:YAG 고체 포화 흡수체, 및 출력경으로 구성된다. 전반사경 및 출력경은 평면경이 사용되었고, 전체 공진기 길이는 약 19 cm였다. 여기용 레이저 다이오드는 Thomson사 제품(모델명: TH-C1310-F)으로 연속으로 최고 10 W 출력 발진이 가능하고, 직경이 900 μm 인 광섬유 다발에 연결되어 있다. 광섬유 다발에서 나오는 레이저 다이오드 출력은 초점거리가 각각 50.5 와 40.8 mm인 평면 볼록형 렌즈로 구성된 여기 광학계에 의해 이득 매질에 집속되었다. 이득 매질인 Nd:YAG는 직경 6 mm, 길이 8 mm 인 붐으로 Nd 이온이 1.0 at. % 첨가되었고, 양면이 발진 파장인 1.064 μm 에 무반사 코팅되어있다. Q-switch로 사용된

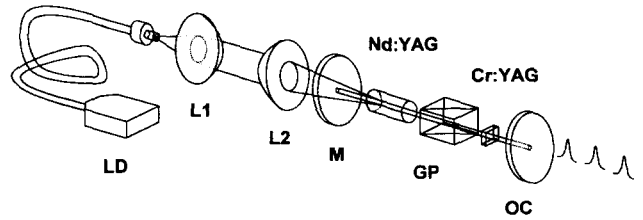


그림 1. 수동형 Q-switching된 레이저 다이오드 뒷면 여기 Nd:YAG 레이저의 장치도. LD: 레이저 다이오드, L1, L2 : 렌즈, M : 전반사경, GP : Glan 편광기, OC : 출력경.

Cr⁴⁺:YAG는 CASIX사 제품으로 양면이 1.064 μm 에 무반사 코팅 되어있으며, 5×5 mm² 크기에 길이가 약 1 mm이고, 낮은 강도 투과율(low-intensity transmission)이 각각 75, 80, 85와 90%인 시료들이 사용되었다. Nd:YAG 이득 매질은 인듐 박막에 의해 구리 지지판과 열적 접촉을 시켰고, 구리 지지판은 레이저 다이오드와 함께 단일 물냉각기로 온도 안정화를 시켰다. 냉각수의 온도를 15°C로 유지할 때 Nd:YAG 레이저에서 최고 출력을 얻을 수 있었고, 이 때, 분광기를 사용하여 측정된 레이저 다이오드의 파장은 807 nm였다.

4. 연속 출력 및 Q-switching 출력 특성

레이저 다이오드 뒷면 여기서 이득 매질에 집속되는 여기 빔의 크기를 아는 것은 여기 효율을 최적화하는데 있어서 중요하다. Nd:YAG 붐에 집속되는 레이저 다이오드 빔의 크기를 광산란기와 영상 전송 장치 및 전하 결합형 소자(CCD)로 구성된 영상 전송 장치를 이용하여 측정하였으며, knife-edge 방식으로 빔의 크기를 결정하였다. 영상 전송 장치는 초점거리가 각각 30 mm와 50 mm인 평면 볼록형 렌즈로 구성되고 측정결과 영상 확대율이 약 1.62배였다. 그림 2는 영상 전송 장치로 측정된 집속된 레이저 다이오드 빔의 크기를 보여주고 있다. 여기 광학계와 Nd:YAG 이득 매질 사이에 놓인 전반사경에 의한 공간적인 제약과 레이저 다이오드가 광섬유 다

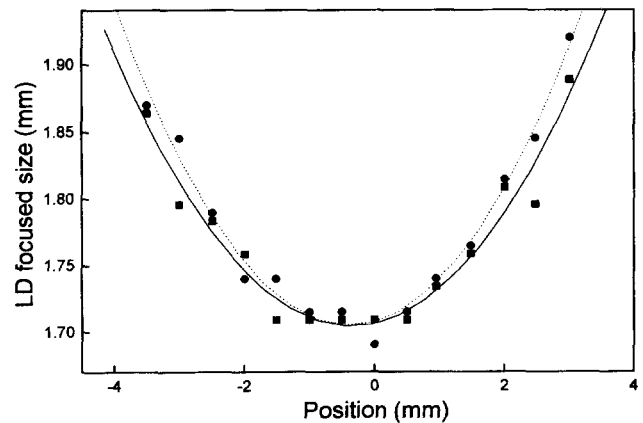


그림 2. 영상 전송 장치로 측정된 여기용 레이저 다이오드의 집속된 빔의 크기 변화. ■: 횡방향으로 집속되는 빔의 크기, ●: 종방향으로 집속되는 빔의 크기, 실선: 횡방향 추세선, 점선: 종방향 추세선.

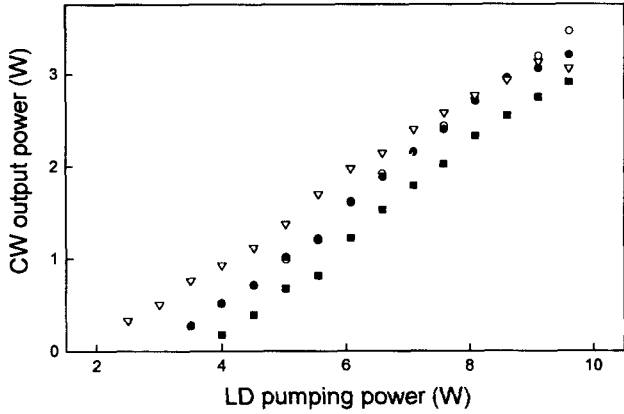


그림 3. 레이저 다이오드로 여기된 Nd:YAG 레이저의 반사율 변화에 따른 무편광 연속 출력 특성. 출력경 반사율 ■: 80%, ○: 85%, ●: 89%, ▽: 95%.

발에 연결되어 있어서 여기빔이 잘 집속되지는 않았다. 집속된 레이저 다이오드 빔은 횡방향과 종방향의 크기가 거의 같고, 레이저 다이오드의 출력이 4 W일 때, 그림에서 보는 바와 같이 집속된 여기빔의 직경은 약 1.7 mm였다.

그림 3은 Nd:YAG 이득 매질만으로 구성된 레이저의 연속 출력을 측정된 결과이다. 레이저의 출력은 OPHIR사의 에너지 검출기로 측정하였고, 출력경은 반사율이 각각 80, 85, 89, 95%인 것이 사용되었다. 출력경의 반사율이 85%일 때 최고 출력이 관측되었고, 이 때, 출력은 약 3.5 W이었다. 출력경의 반사율이 85%일 때 문턱 여기 출력은 3.1 W이었고, 기울기 효율(slope efficiency)은 약 54%이었다. 한편, 문턱 들뜸 효율 η_{exc} 은 식 (7)으로부터 문턱 여기 출력에서 레이저 붐에 흡수되고 남은 여기광의 출력을 측정하여 계산하였다. 레이저 다이오드 뒷면 여기시 레이저 붐에 흡수된 출력은 이득 매질의 뒤에 에너지 검출기를 설치하여 흡수되지 않고 투과한 출력을 측정하면 쉽게 알 수 있다. 본 연구에서는 최고 출력을 얻은 경우에 문턱 들뜸 효율을 측정하였다. 여기광의 출력이 3.1 W이었을 때 흡수되고 남은 여기광은 0.73 W로 관측되었으므로, 흡수율은 약 76%, 문턱 들뜸 효율은 $0.72 \times 2.37 / 3.1$ 로

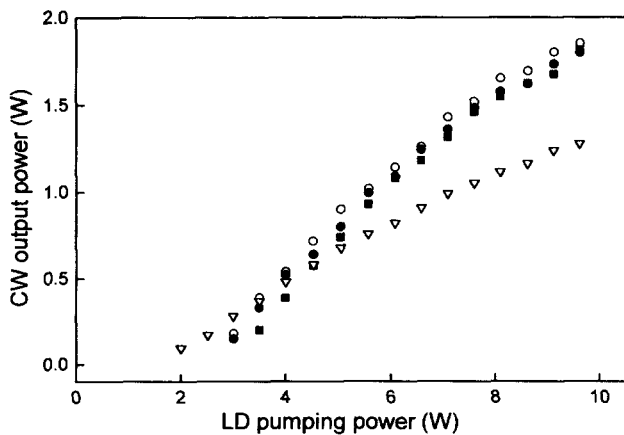


그림 4. 레이저 다이오드로 여기된 Nd:YAG 레이저의 반사율 변화에 따른 편광 연속 출력 특성. 출력경 반사율 ■: 80%, ○: 85%, ●: 89%, ▽: 95%.

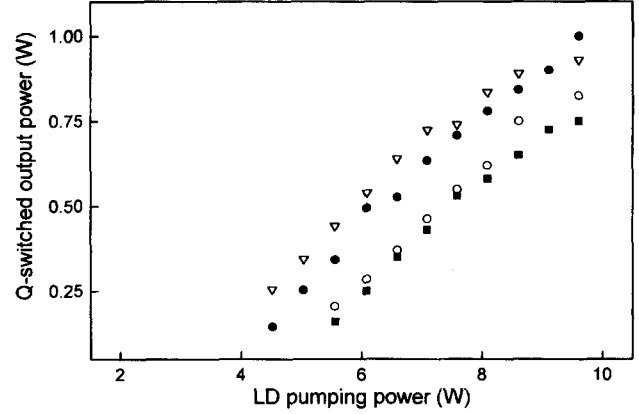


그림 5. 레이저 다이오드로 여기된 Q-switching된 Nd:YAG 레이저에서 Cr⁴⁺:YAG의 낮은 강도 투과율 변화에 따른 연속 출력 특성. Cr⁴⁺:YAG의 낮은 강도 투과율 ■: 75%, ○: 80%, ●: 85%, ▽: 90%.

약 55%이었다. 이 들뜸 효율은 과거 측면 여기 방식의 경우에 측정된 35%나 38%의 결과^[12,10]보다 좋은 결과를 보여주고 있다.

레이저로부터 단일 편광만을 발진시키기 위해 공진기내에 Glan 편광기를 설치하고, 출력경의 반사율을 80, 85, 89와 95%로 바꾸어 가면서 출력을 측정하였다. 그림 4는 레이저 공진기내부에 Glan 편광기가 설치되었을 때, 측정된 Nd:YAG 레이저의 연속 출력이다. 레이저 공진기내부에 편광기가 설치되었을 때, 전체적으로 출력은 저하되었으며, 편광기가 없을 때와 마찬가지로 출력경의 반사율이 85%이었을 때 최고 1.85 W의 출력을 얻을 수 있었다.

Cr⁴⁺:YAG를 이용한 Q-switching은 단지 공진기내에 Cr⁴⁺:YAG를 설치함으로써 수행된다. 그림 5는 출력경의 반사율이 85%일 때, Cr⁴⁺:YAG의 낮은 강도 투과율을 변화시켜가면서 측정된 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 평균 출력이다. 포화 흡수체로 사용된 Cr⁴⁺:YAG 포화 흡수체의 낮은 강도 투과율로 인해 공진기 내부 손실이 증가하여, Q-switching된 레이저의 평균 출력은 전체적으로 감소하였다. 대체적으로 Cr⁴⁺:

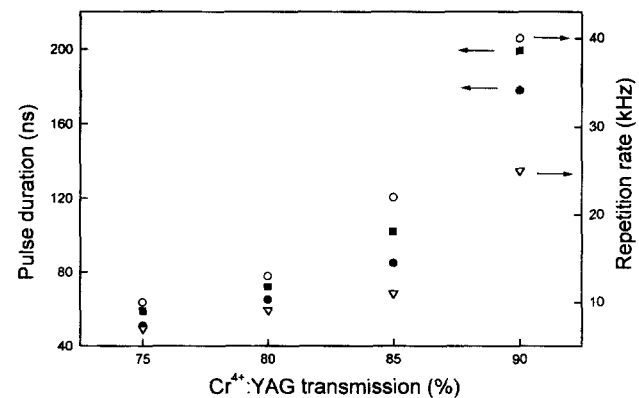


그림 6. Cr⁴⁺:YAG 포화 흡수체의 낮은 강도 투과율 및 출력 변화에 따른 레이저 펄스의 펄스폭 및 반복을 변화. ■: 500 mW에서의 펄스폭, ●: 최고 출력에서의 펄스폭, ▽: 500 mW에서의 반복율, ○: 최고 출력에서의 반복율.

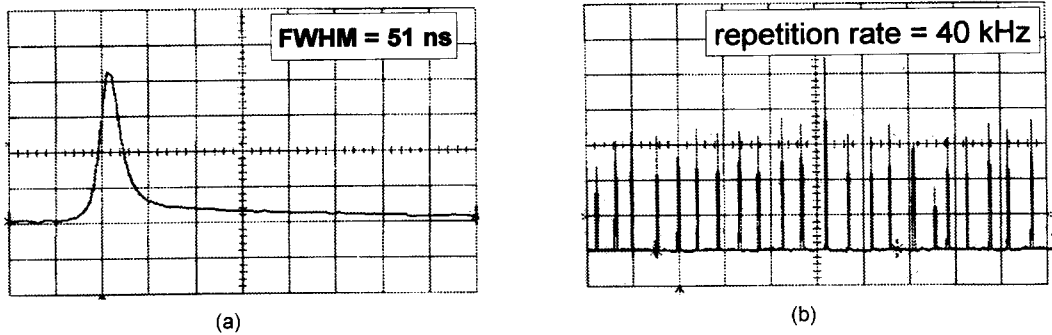


그림 7. Q-switching된 레이저 펄스의 시간적 모양(a)과 펄스열 사진(b). (a). 0.1 μ , (b). 50 μ s/div.

YAG의 낮은 강도 투과율이 높을수록 평균 출력은 증가하였고, 문턱 여기 출력은 낮아졌으며, Q-switching된 Nd:YAG 레이저 평균 출력은 최대 여기광의 세기에서 낮은 강도 투과율이 85%인 Cr⁴⁺:YAG를 사용하였을 때 1 W로 가장 크게 측정되었다.

수동형 Q-switching된 레이저의 펄스폭 및 반복율은 레이저 공진기 내의 이득 및 사용된 포화 흡수체의 낮은 강도 투과율에 따라 변한다. Q-switching 이론에 의하면 공진기 내의 이득이 크면 펄스폭은 짧아지고 반복율이 증가하며, 포화 흡수체의 낮은 강도 투과율이 높으면 Q-switching이 일어나는 2차 문턱(Second Threshold)에 도달하는 시간이 짧아져서 반복율이 증가하여 펄스폭은 늘어나고 펄스당 에너지가 감소하게 된다.^[13] 본 실험에서는 레이저의 펄스폭 및 반복율을 Cr⁴⁺:YAG의 낮은 강도 투과율과 평균 출력을 변화시켜 가면서 측정하였다. 평균 출력의 증가는 공진기 내의 이득의 증가를 의미하며, 평균 출력이 500 mW인 경우와 각각의 Cr⁴⁺:YAG 결정을 사용하였을 때 얻을 수 있는 최고 출력의 경우에 측정하여 비교하였다. 측정된 펄스폭과 반복율이 그림 6에 나타나 있다. 레이저의 펄스폭은 사용된 Cr⁴⁺:YAG의 낮은 강도 투과율과 출력에 따라 50에서 200 ns사이에서 변화하였으며, Q-switching 이론에서처럼 사용된 Cr⁴⁺:YAG의 낮은 강도 투과율이 낮아 2차 문턱에 도달하는 시간이 길어질수록, 공진기의 이득이 커져 평균 출력이 높을수록 펄스폭이 짧아졌다. 본 연구에서는 75%의 낮은 강도 투과율을 갖는 Cr⁴⁺:YAG로 750 mW의 평균 출력으로 동작시켰을 때, 가장 짧은 펄스폭을 얻을 수 있었고 이때 펄스폭은 51 ns였다. 레이저 펄스의 반복율을 또한 레이저 공진기 내의 이득과 사용된 Cr⁴⁺:YAG의 낮은 강도 투과율이 높아질수록 2차 문턱에 도달하는 시간이 짧아져서 반복율이 높아졌다. 90%의 낮은 강도 투과율을 갖는 Cr⁴⁺:YAG로 1 W의 평균 출력으로 동작시켰을 때, 최고 약 40 kHz의 고반복율을 얻을 수 있었다. 이 때, 펄스당 에너지는 레이저의 출력에 따라서는 크게 변하지 않았으며, Cr⁴⁺:YAG의 낮은 강도 투과율이 90, 85, 80, 75%로 낮아질수록 25, 50, 62, 75 μ J로 높아지는 경향을 보였다.

그림 7은 51 ns의 펄스폭을 갖는 Q-switching된 레이저 펄스의 시간적 모양과 40 kHz로 동작하는 레이저 펄스열 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 Cr⁴⁺:YAG를 이용한 Q-switching에서 레이저 펄스의 세기 및 반복율은 안정되게 유지되지

않았다. 이는 포화 흡수체로 사용된 Cr⁴⁺:YAG에서 발생한 열에 의한 출력의 요동과 레이저 자체의 혼돈적 특징^[14]에 의해서 발생한 것으로 보인다. 레이저 펄스의 세기 및 반복율을 안정시키기 위해서는 Cr⁴⁺:YAG의 온도 안정화와 수동형 Q-switching이론 연구를 통하여 레이저 출력의 혼돈 현상을 이해하고 최적의 안정적 레이저 동작 조건을 찾는 등의 보완 연구가 필요하다고 생각한다.

5. 결 론

본 논문에서는 레이저 다이오드 뒷면 여기 Nd:YAG 레이저를 제작하고, 뒷면 여기 방식식 들뜸 효율을 측정하였다. 뒷면 여기 방식식 들뜸 효율은 여기광이 레이저 붐에 흡수된 양을 측정하면 쉽게 구할 수 있었다. 또한, Cr⁴⁺:YAG 결정을 이용한 수동형 Q-switching을 수행하여 평균 출력, 펄스폭 및 반복율 특성등을 조사하였다. 수동형 Q-switching된 레이저의 펄스폭 및 반복율등은 평균 출력과 Cr⁴⁺:YAG 포화 흡수체의 낮은 강도 투과도에 따라 변화하였으며, 평균 출력은 최고 1 W, 펄스폭은 최저 51 ns를 얻을 수 있었고 최고 약 40 kHz의 고반복율로 동작시킬 수 있었다. 앞으로 Cr⁴⁺:YAG의 온도 안정화와 수동형 Q-switching의 이론 연구를 통한 Q-switching된 레이저의 출력 및 반복율 안정화에 관한 연구를 진행시킬 예정이다.

참고문헌

- [1] T. T. Kajava and A. L. Gaeta, *Opt. Lett.*, **21**, 1244 (1996).
- [2] A. Agnesi, S. Dell'Acqua and G. C. Reali, *Opt. Commun.*, **133**, 211 (1997).
- [3] J. A. Morris and C. R. Pollock, *Opt. Lett.*, **15**, 440 (1990).
- [4] K. Spariosu, W. Chen, M. Birnbaum and A. V. Shestakov, *Opt. Lett.*, **18**, 814 (1993).
- [5] Y. Ishida and K. Naganuma, *Opt. Lett.*, **21**, 51 (1996).
- [6] H. L. Offerhaus, H. P. Godfried and W. J. Witteman, *Opt. Commun.*, **128**, 61 (1996).
- [7] A. Agnesi, E. Piccinini, G. C. Reali and C. Solcia, *Appl. Phys. B*, **65**, 303 (1997).
- [8] D. Findlay and R. A. Clay, *Phys. Lett.*, **20**, 277 (1966).
- [9] F. Hollinger, R. Niderig and J. Unruh, *Optics & Laser*

- Technology, **24**, 353 (1992).
- [10] 김광석, 김연수, 김정묵, 김철중, 응용물리, **10**, 423 (1997).
- [11] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (Springer-Verlag, Berlin, 1996), p. 93.
- [12] T. Brand, Opt. Lett., **20**, 1776 (1995).
- [13] A. E. Siegman, *Laser* (University Science Book, 1986), p. 1024.
- [14] T. Midavaine, D. Dangoisse, and P. Glorieux, Phys. Rev. Lett., **55**, 1989 (1985).

Measurement of excitation efficiency and passively Q-switched characteristics of laser diode end-pumped Nd:YAG laser by using Cr⁴⁺:YAG as a saturable absorber

Tae-Moon Jeong, Kwang-Suk Kim, Hee-Jong Moon, Jong-Hoon Yi, Cheol-Jung Kim and Jongmin Lee
Basic Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-600

(Received May 29, 1998, Revised manuscript received July 8, 1998)

Passively Q-switched, laser diode(LD) end-pumped Nd:YAG laser was demonstrated by using Cr⁴⁺:YAG as a saturable absorber. In addition, we could calculate an excitation efficiency, which is an important parameter to evaluate the pumping geometry, directly by measuring the absorbed power in Nd:YAG at threshold condition. We found that output parameters such as average power, pulse duration, and repetition rate strongly depended on the low intensity transmission of Cr⁴⁺:YAG and driving current of laser diode. The maximum Q-switched output power of 1 W was obtained with 40 kHz repetition rate. The pulse duration was varied from 50 ns to 200 ns.