

## 다이오드 레이저로 여기되는 Tm:YAG 레이저의 출력 특성 연구

정태문 · 김철중 · 김현수 · 문희종

한국 원자력 연구소 양자광학기술개발팀

김광석

(주) 금광

J. Jabczynski

MUT, Poland

(2000년 4월 4일 받음, 2000년 7월 25일 수정본 받음)

다이오드 레이저 뒷면 여기 방식을 이용하여 발진 파장이 2.02  $\mu\text{m}$ 인 중적외선 Tm:YAG 레이저를 제작하고, 출력 특성을 조사하였다. 레이저의 출력은 Tm:YAG 결정의 온도에 민감하게 변화하였으며, 레이저의 출력경이 곡면경인 경우에 평면경인 경우보다 더 큰 출력을 얻을 수 있었다. 곡면경을 사용하고 Tm:YAG 결정을 지지하는 구리 지지대의 온도를 6°C로 낮추었을 때, 최고 1.2 W의 출력을 얻을 수 있었다. 이 때, 문턱 여기 출력은 약 1.6 W이었고, 기울기 효율(slope efficiency) 및 광학 효율(optical to optical efficiency)은 각각 29%와 20%이었다.

OCIS codes : 140.3480, 143.3410, 140.3380.

### I. 서 론

현재 전세계적으로 물에 의한 흡수가 좋고, 눈에 안전해서 (eye-safe) 의료용 및 대기 측정기로 사용될 수 있는 중적외선 영역의 레이저가 활발히 개발되고 있는 실정이다. 이러한 중적외선 영역의 레이저를 개발하는 방법으로 광 매개 발진기 (optical parametric oscillator)에 의한 중적외선 발생<sup>[1]</sup>이나 중적외선 영역에서 천이 띠를 갖는 레이저 결정을 이용한 중적외선 레이저 발생 등이 있다. 그러나, 중적외선 레이저 개발은 광 매개 발진기에 의한 중적외선 발진보다 비용이 적게 들고, 장치가 간단하며, 효율적으로 중적외선 영역의 파장을 개발하게 하는 장점이 있다. 대표적인 중적외선 발생 레이저 매질로 Tm 이온이 첨가된 YAG(Tm:YAG)<sup>[2-4]</sup>와 YLF(Tm:YLF)<sup>[5]</sup>가 있다.

Tm:YAG 및 Tm:YLF 결정을 이용한 레이저의 발진은 1960년대 중반에 이미 이루어졌다.<sup>[6]</sup> 그러나, 광 흡수선 영역에서 흡수 계수가 작아 섬광등으로 광여기하는 것이 어려워서 출력 특성 등에 관한 자세한 연구가 미미하다가, 고효율 반도체 레이저와 Ti:Sapphire 레이저의 등장으로 연속 출력 특성, 펄스형 출력 특성 등에 관한 연구가 광범위하게 이루어졌다. 이와 같은 Tm:YAG 레이저 결정은 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 준 삼준위(Quasi-three level) 레이저 결정으로  $^3\text{H}_6$ - $^3\text{H}_4$  천이를 이용하여 광여기하고  $^3\text{F}_4$ - $^3\text{H}_6$  천이에 의해 레이저가 발진된다. 그림 1(b)에 다이오드 레이저 여기 파장에 대한 Tm:YAG 결정의 흡수율이 표현되어 있다.  $^3\text{H}_6$ - $^3\text{H}_4$  천이 level에 해당하는 다이오드 레이저 발진 파장 영역은 785 nm로 이 파장에서 흡수율이 가장 크므로 785 nm에서 광여기 하는 것이 유리하다. 그러나, 785 nm에서의 흡수 단면적(absorption

cross section)은  $5.1 \times 10^{-21}$ <sup>[7]</sup>으로 Nd:YAG와 비교하여 볼 때, 여전히 100배 정도 작으므로 흡수율을 높이기 위해서 보통 수 % 이상 Tm 이온을 YAG 결정에 첨가하여야 한다.

Tm 이온을 수% 이상 첨가하게 되면  $^3\text{H}_4$ - $^3\text{F}_4$  천이에 의한 복사광으로  $^3\text{F}_4$ - $^3\text{H}_6$  천이 띠를 재여기하는 것이 가능하며 이러한 재여기 과정을 cross relaxation이라고 부르며,<sup>[6]</sup> 하나의 광자로 두 개의 광자를 생성할 수 있다하여 “two for one” 여기라고도 한다. 이러한 여기구조로 인해 Tm:YAG 결정의 양자효율은 2에 이른다. 그러나, 이러한 재여기 과정은 국부적으로 많은 열을 발생시켜 Boltzman 열분포에 의한 하준위의 밀도 증가와 더불어 레이저 발생시 레이저 광의 흡수를 증가시키므로 결과적으로 문턱 여기 출력을 높이는 역할도 하게 된다. 따라서, 레이저 발진 출력이 온도에 민감한 영향을 받게 된다.<sup>[8]</sup>

본 연구에서는 785 nm를 침투 파장으로 갖는 최대 연속 출력 7.5 W의 다이오드 레이저를 이용하여, Tm 이온이 6% 첨가된 Tm:YAG 레이저 결정을 여기하여 중적외선 영역인 파장 2.02  $\mu\text{m}$ 를 갖는 Tm:YAG 레이저를 제작하고, 그 출력 특성을 조사하였다. 또한, 레이저 여기 구조의 성능 평가에 중요한 변수가 되는 들뜸 효율을 측정하였다.

### II. 다이오드 레이저 여기 Tm:YAG 레이저

다이오드 레이저로 여기되는 Tm:YAG 레이저의 장치도는 그림 2와 같다. 다이오드 레이저로 여기되는 Tm:YAG 레이저는 여기용 다이오드 레이저, 여기 광학계, Tm:YAG 결정 및 출력경으로 구성된다. Tm:YAG 결정은 직경 3 mm 길이 5 mm의 봉으로, 한 면이 여기 파장인 785 nm에서 HT(High

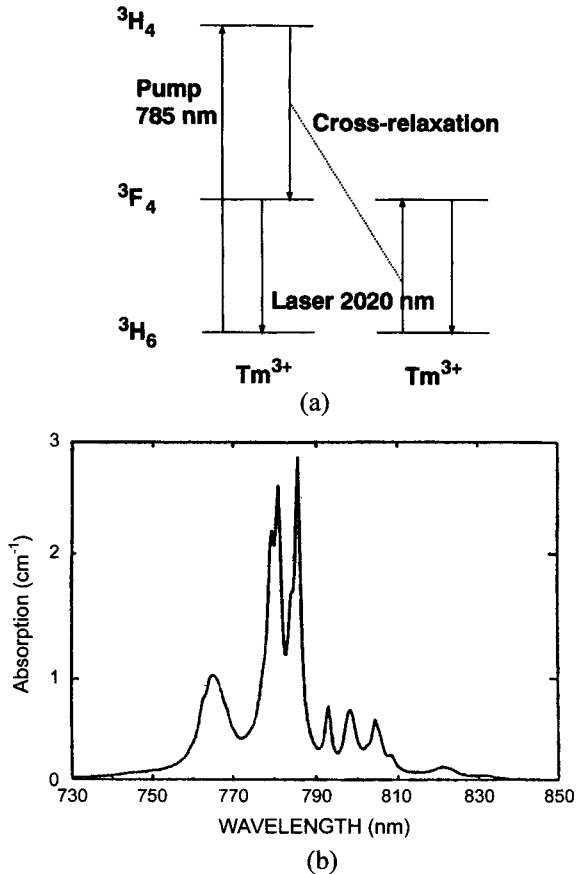


그림 1. Tm:YAG 결정의 에너지 띠 구조 및 흡수 스펙트럼. (a) 에너지 띠 구조, (b) 흡수 스펙트럼.

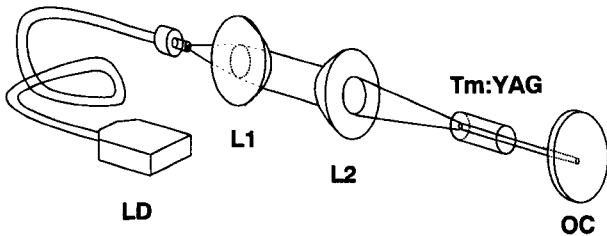


그림 2. 다이오드 레이저 뒷면 여기 Tm:YAG 레이저의 장치도. LD: 다이오드 레이저, L1: 평볼록 시준 렌즈, L2: 비구면 집속 렌즈, OC: 출력경.

Transmission) 코팅과 발진 파장인  $2.02 \mu\text{m}$ 에서 HR(High Reflection) 코팅이 되어있고, 다른 면은 발진 파장에 대해서 무반사 코팅되어 있다. 출력경으로는 투과율이 3.7%인 평면경과 투과율이 3%이고 곡률 반경이 50 mm인 곡면경 두가지 종류를 사용하였다.

그림 3은 본 연구에 사용된 Tm:YAG 결정의 코팅 상태를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 한 면은 발진 파장인  $2 \mu\text{m}$  이상에서 거의 전반사가 일어나고 여기 파장인 785 nm에서 약 95%이상의 투과율을 갖고, 다른 면은 발진 파장 근처에서 반사율이 0.2%이하임을 알 수 있다. Tm:YAG 이득 매질은 인듐 박막으로 감싸 구리 지지대와 열적 접촉을 시켰고, 열전 냉각기(Thermo-Electric Cooler)로 구리 지지대를 냉

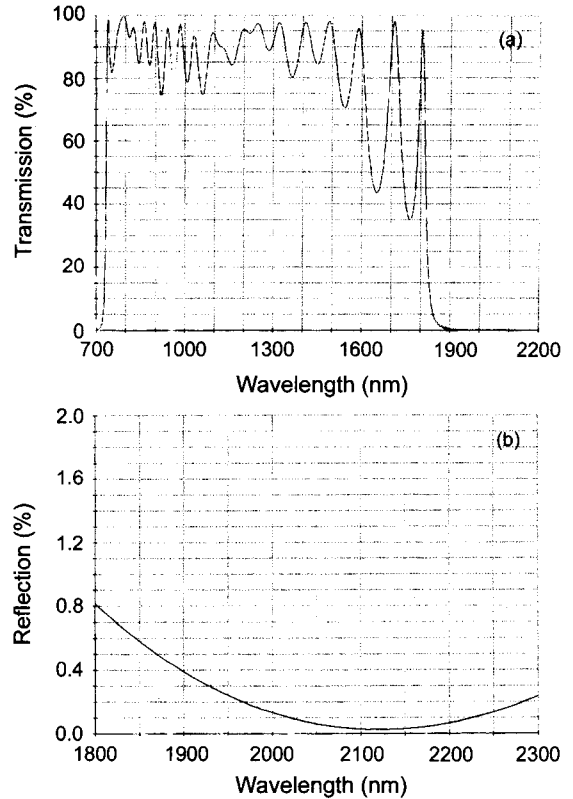


그림 3. Tm:YAG 결정의 코팅 상태. (a) 거울면의 코팅 상태, (b) 거울 반대면의 코팅 상태.

각시켰다. 출력경은 레이저 발진 파장인  $2 \mu\text{m}$  파장에서 흡수를 방지하기 위해서 Infrasil을 재질로 사용하였으며, 전체 공진기의 길이는 약 15에서 20 mm였다.

여기용 다이오드 레이저는 SLI(Semiconductor Laser International corp.)사 제품으로 코어 직경이 0.63 mm인 길이 1 m 광섬유에 연결되어 있으며, 침두 파장은 785 nm, 개구수(Numerical Aperture) 0.22로 연속 출력으로 최대 7.5 W가 가능하다. 다이오드 레이저의 파장 가변 및 온도 안정화를 위하여 다이오드 레이저를 열전 냉각기에 부착시켰다. 광섬유를 통해서 나오는 다이오드 레이저 출력을 초점거리가 50.5 mm인 평면 볼록 렌즈를 통해 시준하고, 초점거리가 23.5 mm인 비구면 렌즈를 이용하여 이득 매질인 레이저 결정에 집속하였다. 따라서, 집속된 여기광의 크기는 직경 약 0.3 mm로 계산되었다.

### III. 다이오드 레이저의 동작 특성 및 Tm:YAG 결정의 들뜸 효율 측정

다이오드 레이저의 발진 파장은 동작 온도 및 동작 전류에 따라 변화한다. 따라서, 동작 온도 및 동작 전류에 따른 발진 파장의 변화는 다이오드 레이저 여기 고체 레이저에서 반드시 조사하여야 할 부분이다. 본 연구에서는 동작온도 및 전류에 따른 다이오드 레이저 침두 파장(peak wavelength)을 측정하였다. 본 다이오드 레이저의 최대 동작 전류는 18 A이고, 본

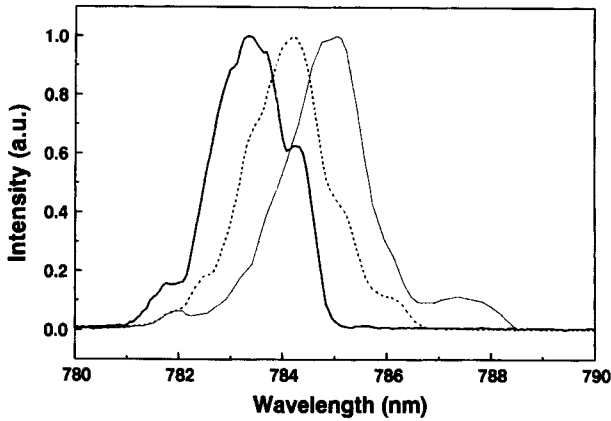


그림 4. 다이오드 레이저 동작온도에 따른 다이오드 레이저 발진 파장 변화. (실선: 7.3 A(2.1 W), 대시선: 12.2 A(4.8 W), 점선: 16.9 A(6.9 W)).

실험에서는 16.9 A까지 사용하였다. 측정 결과 본 다이오드 레이저는 전류가 1 A 증가할 때마다 0.1 nm씩 장파장으로 이동하고, 온도 1°C 증가할 때마다 0.3 nm씩 장파장 쪽으로 이동하는 것으로 관측되었다. 그림 4는 다이오드 레이저의 동작 온도가 25°C일 때 동작 전류에 따른 파장을 측정 한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 동작 전류가 16.9 A일 때, 침두 파장이 785 nm인 것을 알 수 있고, 발진 스펙트럼의 반치폭(FWHM)은 약 1.7 nm 정도였다.

레이저 제작시 들뜸 효율(excitation efficiency,  $\eta_{excit}$ )은 레이저의 성능을 평가할 수 있는 중요한 요인이다. 특히, Tm:YAG 레이저 결정과 같이 여기 파장과 발진 파장이 상당히 많이 차이가 나는 경우, 흡수된 에너지가 실제 발진에 참여한 에너지와 많이 다를 수 있어 레이저의 성능을 평가하기 위해서 들뜸 효율을 측정하는 것이 유리할 수 있다. 이러한 들뜸 효율은 광여기에 의해 레이저 붕에 전달되는 에너지 중 윗준위의 상태 밀도에 의해 표현되는 에너지의 비로 계산된다. 뒷면 여기 레이저에서 들뜸 효율의 측정은 정태문 등에 의해 연구되어 쉽게 측정할 수 있는 방법이 개발되었으며,<sup>[9]</sup> 다음과 같은 간단한 식으로 표현된다.

$$\eta_{excit} = \frac{\eta_u}{P} \int_V P_{abs}(r, z) dV \quad (1)$$

여기서,  $\eta_u$ 는 양자효율(quantum efficiency,  $\eta_Q$ )과 스톡스 인자(stokes factor,  $\eta_s$ )의 곱으로 주어지는 윗준위 효율(upper state efficiency),  $P$ 는 여기 출력이고,  $P_{abs}$ 는 단위 부피당 레이저 붕에 흡수되는 출력이다. 따라서, 다이오드 레이저로 레이저 붕의 뒷면을 여기할 경우, 여기광이 레이저 붕에서 흡수된 양만을 측정하면 들뜸 효율을 간단히 측정할 수 있다.

윗준위 효율을 계산하기 위해서는 양자 효율을 계산하여야 한다. 일반적으로 양자 효율은 결정의 활성 이온(active ion) 첨가율에 따라 다르게 나타나고 Tm:YAG 결정을 785 nm로 광여기할 경우, 일반적인 고체 레이저 결정과 달리 cross relaxation 현상에 의해 양자 효율이 1이 넘는다. 활성 이온의 첨가율에 따른 양자효율은 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다.<sup>[10]</sup>

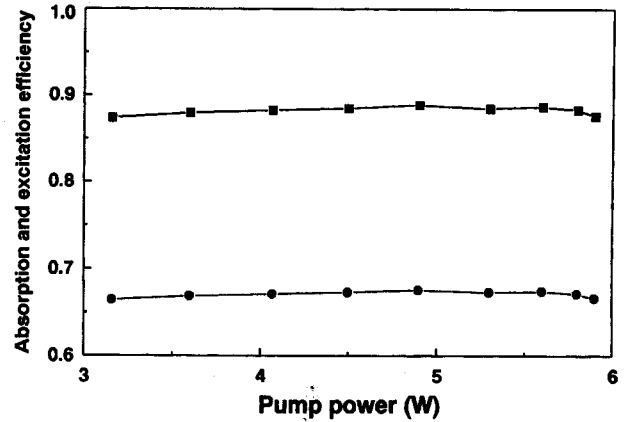


그림 5. 다이오드 레이저로 여기된 Tm:YAG 결정의 흡수율 및 들뜸 효율. (■ : 흡수효율, ● : 들뜸 효율).

$$\eta_{QY} = \frac{1 + 2 \left( \frac{C_{Tm}}{C_0} \right)^2 - \frac{\tau_0}{\tau_r} (1 - \beta)}{1 + \left( \frac{C_{Tm}}{C_0} \right)^2} \quad (2)$$

여기서,  $\beta$ 는  $^3H_4$  준위에서 복사 천이 중  $^3F_4$  준위로 천이하는 비율로 0.16인 것으로 알려져 있는 값이다.  $\tau_0$ 는 고유 형광 완화 시간(intrinsic relaxation lifetime)이고  $C_0$ 는 고유 완화 시간이 절반이 되는 Tm 이온의 첨가율이다. 또한,  $C_{Tm}$  및  $\tau_r$ 은 사용된 결정의 Tm 이온의 첨가율과 이 때의 형광 완화 시간이다. Tm 이온의 첨가율에 따른 형광 완화 시간은 Armagan 등이 이미 조사하였고,<sup>[11]</sup> 본 연구에서는 양자효율을 계산하기 위해서 Armagan의 결과를 인용하였다. Armagan의 결과를 인용하였을 때, 양자효율은 약 1.95인 것으로 계산되었다.

본 논문에서는 다이오드 레이저 뒷면 여기 Tm:YAG 레이저의 들뜸 효율을 측정하였다. 785 nm로 여기하고 2.02  $\mu$ m로 발진하는 경우 Tm:YAG의 스톡스 인자는 0.39이고 본 연구에서 사용된 Tm 이온이 6% 첨가된 Tm:YAG 레이저의 경우 양자 효율이 1.95이므로, 윗준위 효율은 0.76으로 계산되었다. 본 실험에서는 각각의 여기 출력에서 흡수된 여기광을 측정함으로써 들뜸 효율을 측정하였다. 다이오드 레이저의 동작 온도는 25°C였다. 그림 5에 측정된 들뜸 효율이 나타나있다. 여기광 출력은 다이오드 레이저 동작 전류에 따라서 약 87에서 89%까지 Tm:YAG 결정에서 흡수되었으며, 다이오드 레이저의 동작 전류가 14 A일 때 흡수가 최대가 되었고, 이 때 침두 파장은 784.6 nm 여기 출력은 4.9 W였다. 따라서 들뜸 효율은 그림에서 보는 바와 같이 약 66에서 68%까지 변화하였다. 이와 같은 들뜸 효율은 Nd 이온이 1. at.% 첨가된 Nd:YAG 레이저에서 얻어진 60%와 비교하여 볼 때 같거나 우수한 수준임을 알 수 있다.<sup>[9]</sup>

#### IV. 다이오드 레이저 여기 Tm:YAG 레이저의 출력 특성

그림 6은 다이오드 레이저 동작 온도에 따른 Tm:YAG 레이

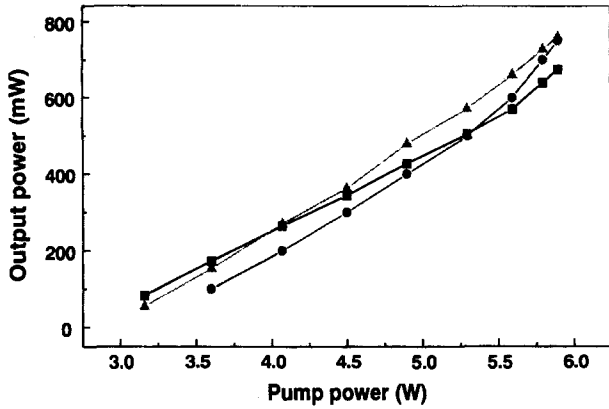


그림 6. 다이오드 레이저 동작 온도에 따른 Tm:YAG 레이저의 출력 특성. (■: 다이오드 레이저 온도 15°C, ●: 20°C, ▲: 25°C).

저 출력을 보여준다. Tm:YAG 결정 지지대의 온도는 23°C로 고정하였으며 다이오드 레이저의 동작 온도를 각각 15, 20, 25°C로 설정하여 실험하였다. 다이오드 레이저의 온도가 25°C 일 때, 가장 큰 Tm:YAG 레이저 출력을 얻을 수 있었다. 앞서 살펴본 바와 같이 일반적으로 다이오드 레이저의 동작온도를 낮추어주면 다이오드 레이저의 출력이 증가하고 발진 파장이 단파장쪽으로 이동한다. 또한, 동작 전류에 의한 침투 파장의 변화가 온도에 의한 침투 파장의 변화보다 덜 민감하고 25°C에서 최대 흡수가 일어나는 785 nm에 더 근접하게 발진되는 것으로 보아 다이오드 레이저의 온도를 25°C로 유지하는 것이 유리한 것을 알 수 있다.

그림 7은 공진기의 길이를 약 18 mm로 하고 투과율이 3.7%인 평면경을 사용하였을 때, 여기 출력에 따른 발진 출력을 측정된 결과이다. 앞에서 언급한 것처럼 Tm:YAG와 같은 준 삼준위 레이저는 레이저 결정의 온도가 레이저 출력에 민감한 영향을 미치므로, 레이저 결정의 온도를 변화시켜가면서 출력을 측정하였다. 다이오드 레이저의 동작온도는 25°C로 고정시켰고, 레이저 결정 지지대의 온도를 각각 6, 15, 23°C로

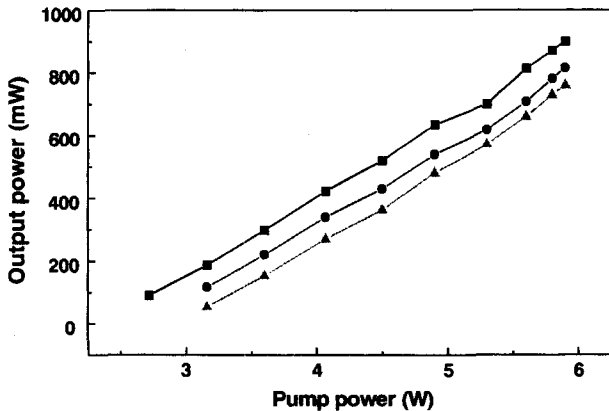


그림 7. Tm:YAG 결정 지지대의 온도에 따른 Tm:YAG 레이저의 출력 특성. (■: 레이저 결정 지지대의 온도 6°C, ●: 15°C, ▲: 23°C).

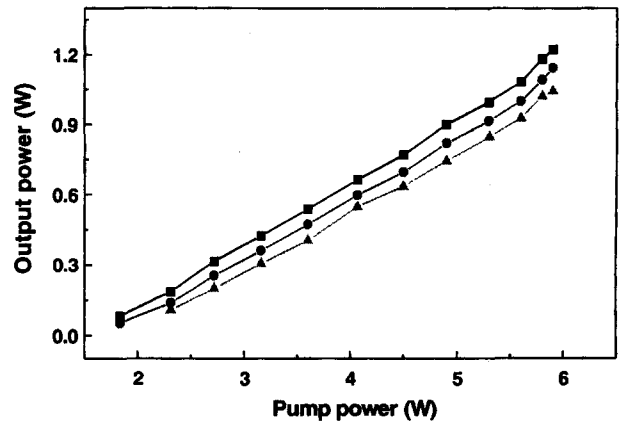


그림 8. Tm:YAG 결정 지지대의 온도에 따른 Tm:YAG 레이저의 출력 특성(곡면경 사용). (■: 레이저 결정 지지대의 온도 6°C, ●: 15°C, ▲: 23°C).

변화시켜 가면서 출력을 측정하였다. 레이저 결정 지지대의 온도가 낮아질수록 레이저의 출력은 증가하고 문턱 여기 출력은 감소함을 알 수 있었다. 문턱 여기 출력은 결정 지지대의 온도를 6, 15, 23°C로 증가시킬 때, 각각 2.4, 2.7, 3 W로 증가하였다. 결정 지지대의 온도가 6°C이고 여기광의 출력이 5.9 W 일 때, 레이저의 출력은 900 mW인 것으로 관측되었다. 이 때, 기울기 효율(slope efficiency) 및 광학 효율(optical to optical efficiency)은 각각 26%와 15%인 것으로 계산되었다.

그림 8은 곡률 반경이 50 mm인 곡면경을 출력경으로 이용하였을 때 출력을 측정된 결과이다. 곡면경의 투과율은 3%이었으며, 레이저 공진기의 길이는 약 19 mm로 여기되는 쪽에서 모드 반경은 0.17 mm인 것으로 계산되었다. 곡면경을 사용한 경우 평면경을 출력경으로 사용한 경우보다 출력이 향상되었으며, 이는 곡면경을 사용하였을 때, 레이저 발진 모드가 여기광에 더 잘 일치하기 때문인 것으로 생각된다. 곡면경의 경우 결정 지지대의 온도 6°C에서 문턱 여기 출력은 1.6 W까지 감소하였으며 여기광의 출력이 5.9 W 일 때, 레이저의 출력은 1.2 W였다. 이 때, 기울기 효율은 약 29%, 광학 효율은 약 20%인 것으로 측정되었다.

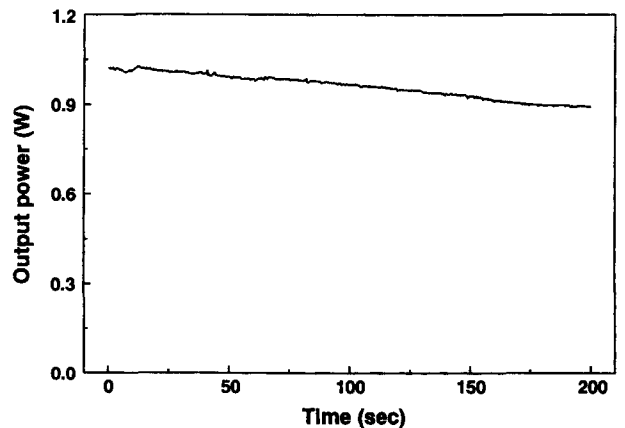


그림 9. Tm:YAG 레이저의 장시간 출력 안정성 측정 결과.

그림 9는 레이저 출력의 장시간 안정성을 조사한 결과이다. Tm:YAG 레이저 결정을 지지하는 구리 지지대의 온도를 15°C로 고정하였으며 레이저의 출력을 200초 동안 감시하였다. 레이저의 출력은 초기에 1 W 이상에서 꾸준히 감소하여 200초 후에는 890 mW 까지 감소하였다. 이는 여기광의 강한 집속으로 인한 국부적인 온도 상승으로 인한 현상으로 보이며, 이를 해결하기 위해서는 순수한 YAG 결정을 여기 방향의 끝면에 접착시키는 방법으로 해결할 수 있을 것이다.<sup>[12]</sup>

## V. 결 론

본 논문에서는 다이오드 레이저 뒷면 여기 증적외선 Tm:YAG 레이저를 제작하고, Tm:YAG 레이저의 여기 특성 및 출력 특성을 조사하였다. 본 실험에서 사용된 6%의 첨가율을 갖는 Tm:YAG 결정에서 여기광은 약 87% 이상 흡수되어, 들뜸 효율은 약 66% 이상인 것으로 측정되었다. 이 결과는 다른 종류의 뒷면 여기 고체 레이저에 비해도 손색이 없는 결과이다. 레이저 출력은 결정의 온도를 낮출수록 증가하였으며, 레이저 결정 지지대의 온도가 6°C이고, 투과율이 3%인 곡면경을 사용하였을 때 최고 1.2 W의 레이저 출력을 얻을 수 있었다. 이 때, 기울기 효율 및 광학 효율은 각각 29%와 20%였다.

## 감사의 글

다이오드 레이저의 열전냉각기를 제작하는데 도움을 준 (주) 금광의 전원덕씨에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] J. T. Lin and J. L. Montgomery, *Opt. Commun.* **75**, 3151 (1990).
- [2] C. Bollig, W. A. Clarkson, R. A. Hayward, and D. C. Hanna, *Opt. Commun.* **154**, 35 (1998).
- [3] P. J. M. Suni and S. W. Henderson, *Opt. Lett.* **16**, 817 (1991).
- [4] J. E. Pinto, L. Esterowitz, and G. H. Rosenblatt, *Opt. Lett.* **17**, 731 (1992).
- [5] T. Yokozawa, J. Izawa, and H. Hara, *Opt. Commun.* **145**, 98 (1998).
- [6] L. F. Johnson, J. E. Geusic, and L. G. Van Uitert, *Appl. Phys. Lett.* **7**, 127 (1965).
- [7] R. J. Beach, S. B. Sutton, E. C. Honea, J. A. Skidmore, and M. A. Emanuel, *OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers*, **1**, 213 (1996).
- [8] T. S. Kubo and T. J. Kane, *IEEE J. Quantum Electron.* **28**, 1033 (1992).
- [9] 정태문, 김광석, 문희중, 이종훈, 김철중, 이종민, *한국광학회지*, **9**, 231 (1998).
- [10] E. C. Honea, R. J. Beach, S. B. Sutton, J. A. Speth, S. C. Mitchell, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel, and S. A. Payne, *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 1592 (1997).
- [11] G. Armagan and A. M. Buoncristiani, *OSA Proc. Tunable Solid State Lasers*, **6**, 144 (1990).
- [12] M. Tsunekane, N. Taguchi, and H. Inaba, *Appl. Opt.* **38**, 1788 (1999).

## Output characteristics of diode-laser-pumped Tm:YAG laser

Tae Moon Jeong, Cheol-Jung Kim, Hyun Su Kim, and Hee Jong Moon  
*Laboratory for Quantum Optics, KAERI, Taejon 305-600, Korea*

Kwang-Suk Kim

*Golden Light Co., Ltd, Taejon 305-600, Korea*

J. Jabczynski

*MUT, Poland*

(Received April 4, 2000, Revised manuscript received July 25, 2000)

Diode-laser-pumped Tm:YAG laser of wavelength 2.02  $\mu\text{m}$  has been manufactured and its excitation efficiency and output characteristics have been investigated. The excitation efficiency was varied from 66 to 68% with respect to the pump power, yielding pump power absorption of 87-89%. The output power was sensitively varied with the temperature of Tm:YAG rod. When the concave output coupler with a focal length of 25 mm and a transmittance of 3% was used, the maximum output power reached up to 1.2 W. The slope and optical efficiency of this Tm:YAG laser was 29% and 20% at 6°C, respectively.

OCIS codes : 140.3480, 143.3410, 140.3380.