

반도체 레이저 측면 여기 Nd:YAG 매질에서의 열영향

양동욱 · 김병태†

청주대학교 레이저광정보공학과

Ⓣ 360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36번지

(2002년 8월 20일 받음, 2002년 12월 18일 수정본 받음)

반도체 레이저 측면 여기시 Nd:YAG 레이저 매질에서 발생하는 열영향에 대해 분석하였다. 열영향을 고감도로 측정하기 위해 편광자와 Nd:YAG 매질 사이에 $\lambda/4$ 판을 삽입하여 여기 파워에 따라 발생하는 depolarization 양을 측정하였다. CCD로는 열영향에 의한 매질 내에서의 탐침광 분포 변화를 측정하고 해석하여 반도체 레이저 측면 여기시 발생하는 열영향을 최소화하기 위한 공진기 설계의 효과적인 방법을 제시하였다.

주제어 : thermal effect, LD pumping, depolarization.

I. 서 론

기체 레이저와 비교해 고체 레이저는 상준위 수명이 매우 길어 반전 분포로 축적되는 에너지 밀도가 높고, 축적 시간이 긴 특성 때문에 고출력 펄스 동작에 적합하여 레이저 핵융합, X-ray 리소그래피, 가공 및 의료 분야 등에 폭 넓게 사용되고 있다.^[1,2] 고체 레이저는 주로 광 여기가 이용되어 플래시램프 및 아크램프를 많이 사용하였으나 발광 파장이 레이저 매질의 흡수 파장과 부정합하여 저효율과 열부하 등의 문제를 발생시킨다.^[3,4] 그러나, 10만 시간 이상 연속 동작하며, 수 백 W급의 고출력에 발진 영역 0.6~1.7 μm 정도로 넓은 반도체 레이저(Laser Diode)를 여기원으로 사용하면 레이저 매질의 흡수 파장과 정합성이 좋아 열부하를 기존의 램프 여기방법보다 1/3~1/5 정도까지 줄일 수 있게 되어,^[5,6] 고효율의 레이저 개발을 가능하게 하였다. 물리적, 화학적으로 안정하고 광학적 특성이 우수하며 열전도율도 좋아 고출력 레이저 매질로 사용하기에 적합한 Nd:YAG를 예로 들더라도 양자효율이 이론적으로 76%이므로 나머지 24%는 매질에서 열로 변환된다고 볼 수 있으므로 높은 파워로 매질을 여기시키면 열영향을 무시할 수 없게 된다.^[3,6]

매질에서 발생한 열은 매질 표면으로부터 냉각이 진행되어 매질 내부에서는 불균일한 온도분포가 발생하게 된다. 이 온도차의 영향으로 레이저 매질에 굴절을 변화가 생기기 때문에 열복굴절과 열렌즈 현상이 일어나 레이저 출력의 손실 및 빛 살 질의 저하를 초래한다. 열적 스트레스는 여기 강도가 증가함에 따라 같이 증가하여 매질의 내구력보다 크게 되면 이로 인해 매질이 손상 및 파괴되는 문제가 발생하며,^[3] 열영향에 의한 매질의 열복굴절은 레이저 출력 펄스의 형상에도 좋지 않은 영향을 미친다.^[8]

주로 선형 편광을 이용하는 고체 레이저는 레이저 매질을 브루스터 각으로 가공하거나 공진기 내부에 편광자 등을 삽입

하는데, 레이저 매질에서 발생한 열복굴절에 의해 리타데이션(retardation)이 일어나 선형 편광 광선이 타원 편광으로 되고, 타원 편광의 수직 성분은 브루스터 판에서 반사를 일으키게 되어 레이저 출력의 손실 뿐 아니라 레이저 광선에 왜곡을 일으키므로 레이저 공진기를 구성하는데 있어서 정량적인 열영향의 해석이 필요하다.

본 논문에서는 반도체 레이저를 측면에서 여기시켰을 때 Nd:YAG 레이저 매질에서 발생한 열영향 특성을 $\lambda/4$ 판을 삽입한 고감도 측정법을 이용하여 측정·해석하였고, 열영향을 최소화시키기 위한 방법에 대하여 기술한다.

II. 열복굴절 현상에 의한 손실량 계산 및 고감도 측정

전기광학 Q-스위치와 같이 선형 편광을 이용하는 공진기의 레이저 매질에서 리타데이션은 편광자에 의해 손실을 유발하는데, 이 때 편광자를 투과한 광의 강도는 다음 식과 같이 주어진다.^[3,8]

$$\frac{I_{out}}{I_o} = 1 - \sin^2(2\Phi) \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (1)$$

여기서, I_o 는 입사광의 에너지, I_{out} 은 투과광의 에너지, 그리고 Φ 는 검광자와 레이저 매질의 한 축이 이루는 각으로 투과광의 강도는 리타데이션 δ 에 관련됨을 알 수 있다. 이 식을 반경 r_o 인 매질 단면을 따라 적분하면,

$$\begin{aligned} \left(\frac{I_{out}}{I_o}\right) &= \left(\frac{1}{\pi r_o^2}\right) \int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{r_o} \left[1 - \sin^2(2\Phi) \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\right] r dr d\Phi \\ &= \frac{3}{4} + \frac{\sin(C_i \eta P)}{4 C_i \eta P} \end{aligned} \quad (2)$$

가 된다.^[3] 여기서, $\delta = 0.05 C_i P \left(\frac{r}{r_o}\right)^2$, $C_i = \frac{-0.0198 n_o^2 \alpha}{\lambda K}$, α 는

†E-mail: btkim@chongju.ac.kr

열 팽창율, K 는 열전도도, n_0 는 매질의 굴절율, λ 는 레이저 광의 파장, 그리고 η 는 여기광의 열변환 비율이다.

여기 파워에 따른 열부굴절에 의한 레이저광의 디폴라리제이션(depolarization) L 은 열영향이 없을 때를 1로 하고 식 (2)를 일반화하면 다음과 같이 구할 수 있다.^[3]

$$L = 0.25 [1 - \text{sinc}(C, \eta P_m)] \quad (3)$$

반도체 레이저 여기방식은 레이저 매질의 흡수 파장과 반도체 레이저의 발진 파장이 잘 일치되기 때문에 높은 흡수 및 양자 효율을 가져 열영향은 적게 일어나게 된다. 따라서, 매질에서 일어나는 열부굴절 현상을 측정하기 위한 검광자와 편광자로 구성된 종래의 Conscope 방법으로는 매질에서의 디폴라리제이션을 측정하기에 어려움이 따른다. 이 점을 해결하기 위해 편광자와 매질 사이에 $\lambda/4$ 판을 삽입하여 강도 변화를 측정하는 방법이 제안되었는데,^[9] 두 측정 방법을 비교하기 위하여 각각의 경우에 대해 Jones Matrix를 사용하여 강도 변화를 구하면 아래와 같다. 먼저 Conoscope 방법에서는

$$I_{out} = I_o \left\{ \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \right\} \quad (4)$$

가 되어 이는 식 (1)과 같은 결과를 보인다. 여기서 강도 변화는 $\sin^2\delta$ 항에 비례하므로 리타레이션이 작게 일어나는 경우에는 디폴라리제이션을 측정하기 어렵다. 그러나, $\lambda/4$ 판을 삽입하면 출력이

$$I_{out} = \frac{I_o}{2} (1 - \sin 2\theta \sin \delta) \quad (5)$$

가 되므로 강도 변화가 $\sin\delta$ 항에 비례하게 되어 Conoscope 방법보다 강도 변화를 측정하기가 쉬워진다.

III. 실험 장치

그림 1은 Nd:YAG 매질에서 발생한 열영향 측정을 위한 실험 장치도이다. 여기원으로 사용된 반도체 레이저는 양자 우물 구조의 GaAlAs계 cw 반도체 레이저로 평균 출력은 20 W이다. 반도체 레이저의 발광 부분 면적은 $1.0 \times 9.6 \text{ mm}$ 이고, 구동 전류 26 A, 25°C 에서 중심 발진 파장이 808 nm, 발진

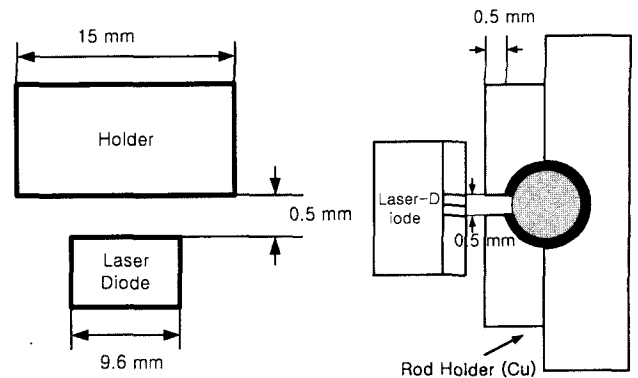


그림 2. 레이저 매질 홀더와 여기광 입력 부분에 대한 장치도.

스펙트럼 반치폭은 1.3 nm이며, 발산각은 수직방향 40° , 수평방향 10° 이다. 발진 파장의 온도에 따른 의존성은 $0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 이고, 전류 의존성은 $0.48 \text{ nm}/\text{A}$ 이다. 반도체 레이저의 구동 드라이버(Avtech:AVO-8B-C-M-P)는 최대 100 A까지 인가할 수 있으며 펄스형과 cw형으로 사용이 가능하다. 구동 전류원(Kenwood:PD 35-20D)은 전류 전원을 최대 20 A, 35 V까지 제공할 수 있는 것을 사용하였다.

실험에 사용된 매질 Nd:YAG는 Nd^{3+} 이 1.1 at.% 첨가된 크기가 $15 \times 4.5 \text{ mm}$ 인 것을 사용하였다. 또한 결정 단면은 1064 nm에 대해 무반사 코팅을 하였으며, 측면은 여기광의 파장인 808 nm에 대해 잘 흡수가 이루어지도록 가공을 하였다.

레이저 매질은 측면 여기 방법을 사용하여 매질 측면에 직접 여기시켰다. 그림 2는 레이저 매질 홀더와 여기광 입력 부분에 대한 장치도이다. 여기시킬 때 레이저 매질에서 발생한 열을 제거하기 위해 레이저 매질 주변을 여기광의 입력 부분 ($15 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}$: 매질 홀더의 길이 입사구의 간격 입사구에서 매질까지의 거리)만 제외하고 구리로 제작한 매질 홀더를 사용하여 매질 측면 전체를 고정시켰으며, 여기광 입력부분의 크기는 반도체 레이저의 발산각을 고려하여 여기 광원과 매질과의 간격이 0.5 mm일 때 여기광이 모두 매질에 입사가 될 수 있는 크기로 제작하였다. 또한 레이저 매질과 홀더 사이에 열전도도를 높이기 위해 인듐 포일로 여기광의 수광부만 제외한 전 부분은 고르게 감싸주었으며, 매질의 홀더와 히트싱크, TEC(Thermal Electric Cooler)사이에는 thermal grease를 고

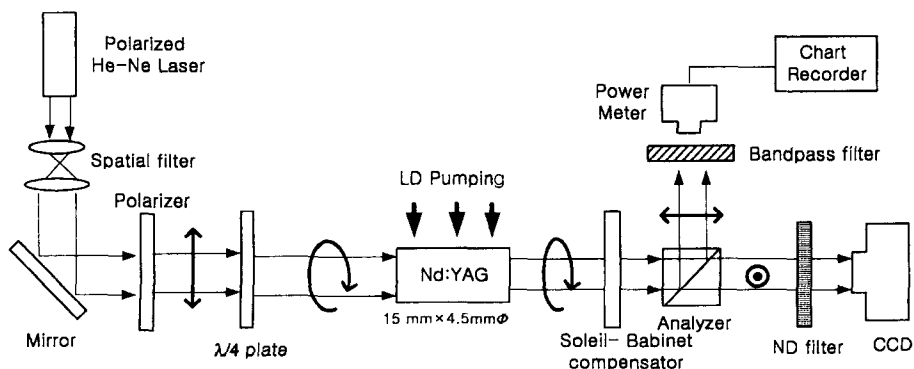


그림 1. 열영향을 측정하기 위한 실험 장치 구성도.

르게 발라 매질에서 발생한 열의 전달이 잘 이루어지도록 하였다.

강도 변화를 측정하기 위한 탐침광으로 사용한 광선은 선형 편광된 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 매질에 입사되는 광선의 크기는 빔살 확대기를 사용하여 매질 직경과 같은 크기로 하였고, 발산각은 1.0×10^{-4} rad이었다. 실험에 사용된 편광자와 검광자는 632.8 nm 파장에 P 성분과 S 성분의 소광비가 1000:1 이상인 편광 빔살 가르게(PBS)를 사용하였다. 또한 Soleil-Babinet 보상기는 열영향에 의해 발생한 리타레이션 정도를 측정하기 위해 삽입하였다.

반도체 레이저 여기 방법은 여기광의 파장과 매질의 흡수 파장의 정합이 잘 이루어져 열영향이 작게 일어난다. 따라서, 레이저 매질에서 발생하는 열영향 현상을 측정하기 위해 $\lambda/4$ 판을 삽입하여 원편광의 탐침광을 레이저 매질에 투과시켜 미세한 변화도 쉽게 측정하도록 하였다. 또한 탐침광의 파워 변화를 측정하는 파워 메타 앞에는 808 nm와 1064 nm에서 99%이상의 반사율을 가진 필터를 사용하여 탐침광의 변화만 측정하도록 하였고, 그 변화는 X-Y 기록계를 사용하여 기록하였다. 횡모드의 변화를 CCD로 촬영할 수 있도록 구성하였고, 이를 해석하기 위해 프레임 그래버(Matrox)를 사용하였다.

VI. 반도체 레이저 측면 여기 Nd:YAG 매질에서 열영향 결과 및 토의

4.1. 열영향에 의한 손실량

열영향에 의한 손실량 측정은 파워 미터(Newport:1815-C)를 사용하였으며, X-Y 기록계를 사용하여 탐침광의 파워 변화를 기록하였다. 열영향에 의한 손실량의 계산은 여기 되지 않은 레이저 매질을 투과한 탐침광의 파워를 기준으로, 여기가 되었을 때 변화된 양의 비로 계산하였다. 그림 3은 5 W 여기시 탐침광의 강도 변화를 기록한 것으로 여기를 시작하거나 끝낼 때에는 급격한 변화를 보이나, 일정한 시간이 지나면 열평형이 이루어져 파워의 변화가 작게 나타나고 있다. 탐침광 파워의 기준선과 매질이 완전히 냉각되어 탐침광의 변화가 없는 상태가 일치하는 것을 실제 실험에서는 확인되었으나 본 논문에서는 지면 여건상 그림에 나타나 있지 않다.

그림 4은 매질 온도와 여기 파워에 따른 손실량 측정값과 열영향 식 (5)를 계산한 값(실선)으로 손실량 측정값은 5 W 시 5.5%, 10 W 시 13.2%, 13 W 시 19.6% 및 15 W 시 24.7%를 나타내었다. 또한 손실량 계산식 (3)을 이용하면 여기파워의 약

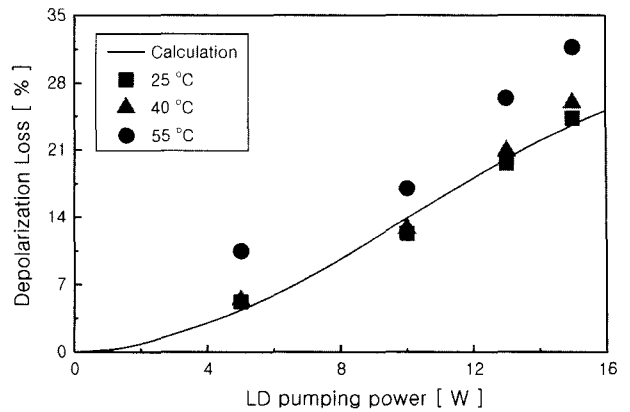


그림 4. 여기 파워에 따른 탐침광의 손실량.

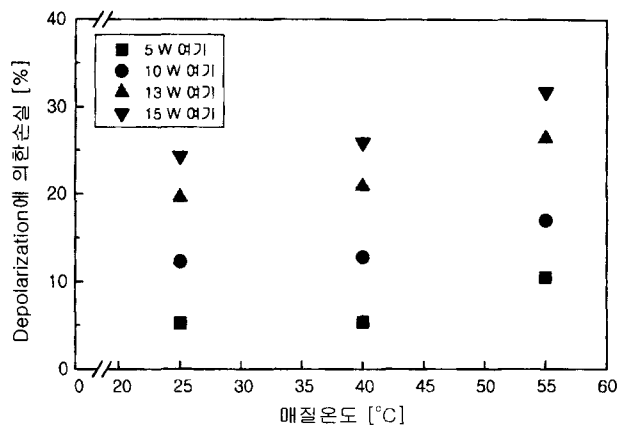


그림 5. 레이저 매질 온도에 따른 탐침광의 파워 변화.

21%가 열로 변화되었음을 알 수가 있었다. 그림 5는 레이저 매질 온도에 따른 탐침광 강도 변화를 알아보기 위한 것으로 각기 다른 온도로 설정하고 여기시켰을 때 열영향에 의한 디폴라리제이션 변화량이 레이저 매질의 온도에 따라 다르게 나타남을 보였다. 이것은 온도 변화에 따른 굴절률 변화의 영향으로 판단되며, 매질의 온도를 낮추면 열영향을 다소 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4.2. 열영향에 의한 탐침광의 2차원적 분포

여기 파워에 따른 탐침광의 2차원 분포를 CCD(삼성: SAC-410ND)로 촬영하였고, 열영향에 의한 강도 변화를 측정하였다. CCD는 측정된 탐침광의 파워 범위인 0.65~1.15 mW에서

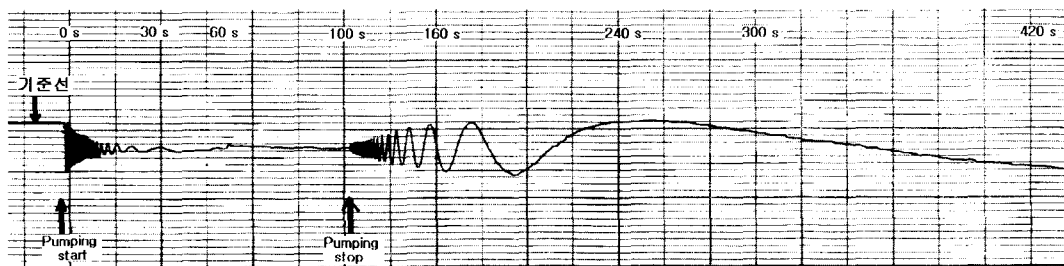


그림 3. 5W 여기시 탐침광의 파워 변화.

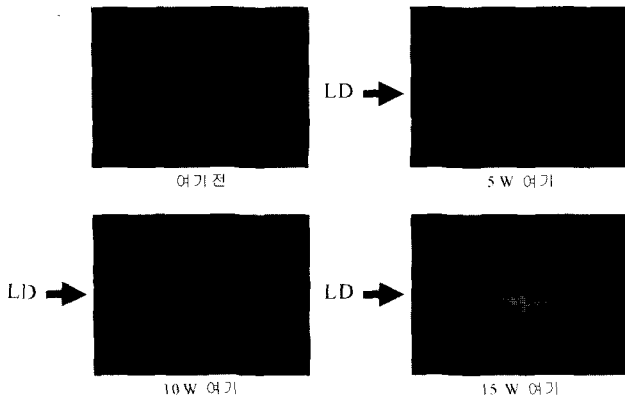


그림 6. 매질 온도 25°C에서 여기 파워에 따른 탐침광의 변화.

입력에 대한 출력비가 선형성을 갖고 있음을 확인하였다. 탐침광의 2차원 분포 측정은 매질 각 부분에서 일어난 열영향에 의한 변화를 관측함으로써 집속 반사경 설계 및 냉각 방법 선정을 뒷받침할 수 있는 좋은 자료가 될 것이다.

그림 6는 매질의 온도가 25°C일 때 여기광의 파워에 따라 변화하는 탐침광의 2차원 분포를 CCD로 촬영한 것이다. 레이저 매질에 여기를 시키지 않았을 때에는 매질을 투과한 탐침광의 분포가 균일하지만, 여기 파워를 증가시키에 따라 열영향에 의해 확연히 변화함을 볼 수 있다. 탐침광의 상태 변화는 여기광을 흡수하는 부분과 매질 중심 부분에서는 변화가 심하지 않지만, 여기광의 흡수가 적으며 히트싱크와 접촉되어 열의 방출이 빨리 일어나는 매질 주변부에서는 심한 변화가 보인다. 이것은 레이저 매질의 중심부보다 매질 주변부로 갈수록 냉각에 따른 스트레스가 강해 변화가 심하게 나타나는 이론과 일치함을 알 수 있다. 그림 7은 레이저 매질의 온도가 25°C일 때 매질 각 부분에서 일어난 리타데이션을 측정할 것을 기울기로 나타낸 것이다. 리타데이션 값의 분포도 여기 파워가 증가함에 따라 여기되는 부분보다 매질 주변부로 갈수록 큰 값

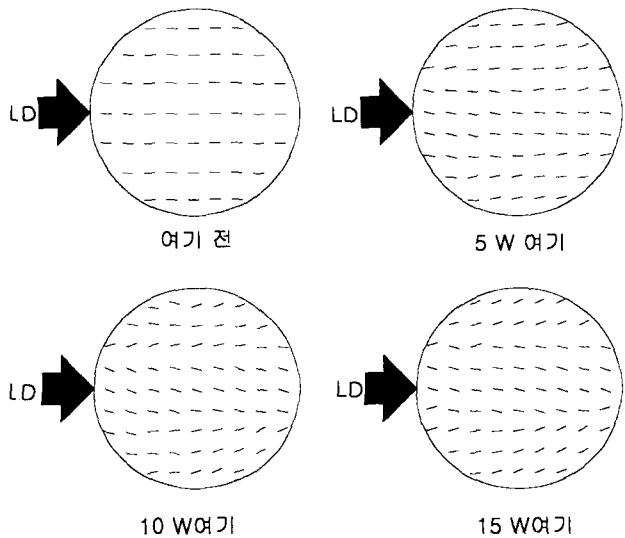


그림 7. 여기 파워에 따른 retardation의 변화 상태.

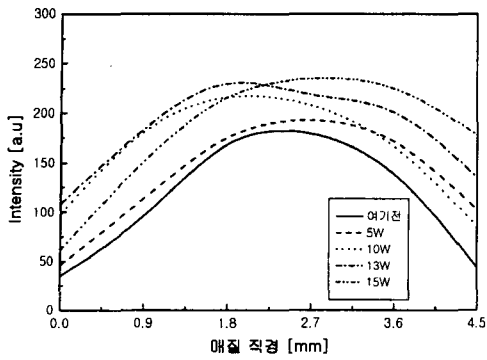
을 갖고, 가로축을 중심으로 상·하 대칭적인 변화를 보여 그림 6의 탐침광 변화와 동일함을 보인다. 15 W 여기 시 리타데이션 값은 매질 중심에서 7°, 냉각이 되는 주변 부분에서 최고 19°의 변화로 불균일하게 나타났다. 탐침광은 매질 중심보다 중심으로부터 매질 외부로 1/3 정도 되는 부분에서 가장 작은 변화를 보였다. 이는 실험에 사용된 매질에서 열평형 상태가 이루어지는 부분으로 생각되며, 이 부분에 레이저광의 공진이 이루어지도록 설계하면 열영향을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4.3. 탐침광의 부분별 변화 측정

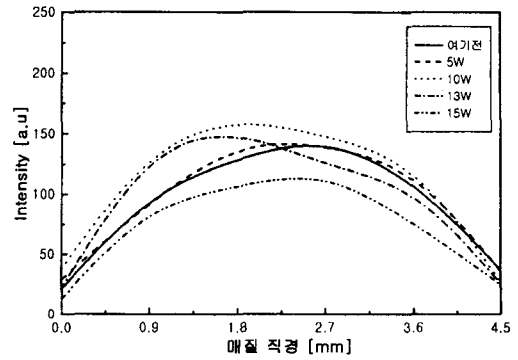
여기 파워에 따른 탐침광의 빛살 형태 변화를 해석하기 위해 매질의 가로·세로 중심부분과 중심에서 상·하·좌·우 각 1 mm 되는 곳에서 변화 상태를 분석하였다.

그림 8은 레이저 매질 온도가 25°C일 때 각 측정 부분에서 변화된 탐침광의 강도분포를 나타낸 것이다. 여기 전에는 투과한 탐침광의 강도분포가 가우시안 형태를 보이나 여기가 되면 각 부분에 따라 변화 정도가 다르게 나타남을 보인다. 이것으로 매질의 각 부분에서 일어나는 열영향이 다르게 나타난다는 것을 알 수 있고, 열영향의 정도도 유추할 수 있다. 여기광의 흡수가 이루어진 가로축의 중심부인 0 mm 부분에서 온도가 가장 높을 것이며, 이 곳에서 멀어질수록 온도가 낮아지므로 탐침광의 변화가 생길 것이다. 가로 중심축에서 탐침광의 강도분포는 여기광이 강해짐에 따라 탐침광의 강도가 증가하나, 상·하 축에서 탐침광 강도는 감소하고 있다. 이것은 레이저 막대가 열영향에 의해 렌즈 역할을 하여 탐침광이 중심으로 모여 생긴 현상으로 해석할 수 있다. 이들 축의 강도 감소는 흡수가 이루어지는 부분보다 냉각되는 부분으로 갈수록 커져 레이저 막대의 굴절을 변화가 매질 오른쪽 부분에서 심하게 일어난다는 것을 알 수 있다. 따라서, 레이저광의 공진을 굴절률의 변화가 작은 매질 왼쪽부분을 중심으로 이루어지도록 공진기를 구성하면 열영향을 최소화시킬 수 있을 것이다. 세로축의 중심과 좌·우 축은 흡수가 이루어지는 가로 중심축을 중심으로 대칭적인 변화를 보인다. 탐침광의 변화는 여기 파워가 작을 때와 히트싱크가 접촉되어 온도 변화가 작은 부분(0 mm, 4.5 mm 부분)은 거의 일정하게 나타난다. 또한 여기 광이 입사하는 부분은 급격한 변화를 보였으나, 냉각이 이루어지는 부분의 변화상태는 적게 일어남을 보아 매질의 냉각을 균일하게 하거나, 여기광을 균일하게 조사하면 열영향이 적게 일어날 것으로 판단된다.

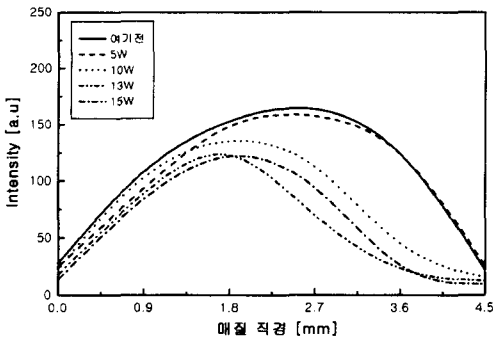
그림 9은 여기 파워가 15 W일 때 가로·세로 중심 축에서 매질 온도에 따른 변화비를 나타낸 것으로 매질 온도 25°C보다 작거나 커짐에 따라 탐침광의 변화 크기가 커지고 있어 열영향도 심하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 탐침광의 변화비는 여기 파워뿐 아니라 매질 온도에 따라 달라지는 것을 보이는데 이것은 매질의 굴절을 변화가 여기광에 의한 스트레스 성분과 온도에 의해 변화는 성분 dn/dT 의 영향이 복합적으로 나타나기 때문인 것으로 판단되며, 매질의 온도와 여기광의 세기에 따라 매질의 변화가 다르다는 것으로부터 열영향을 줄이기 위해 여기 파워에 따라 적절한 온도로 매질을 조절



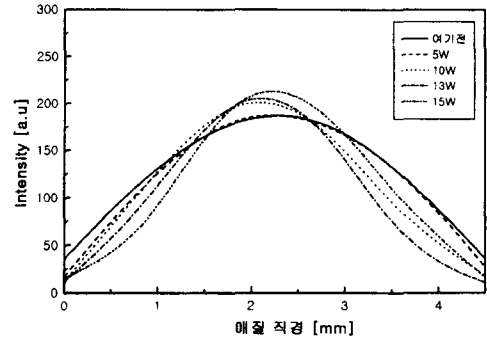
(a) 가로 중심 축



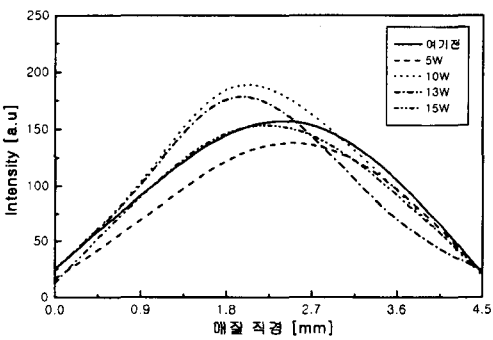
(b) 가로 1mm 위



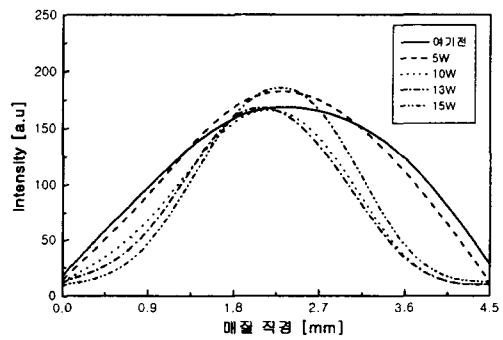
(c) 가로 1mm 아래



(d) 세로 중심축

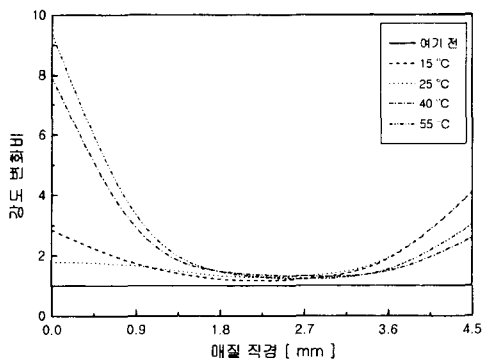


(e) 세로 1mm 왼쪽

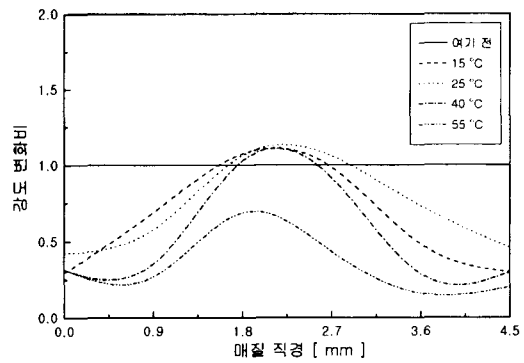


(f) 세로 1mm 오른쪽

그림 8. 레이저 막대 온도 25°C에서 여기 파워에 따른 빛살의 형태 변화.



(a) 가로 중심 축



(b) 세로 중심 축

그림 9. 여기 파워 15W에서 매질 온도에 따른 탐침광의 강도 변화비.

하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

본 실험 조건에서는 여기 파워가 15 W일 때 매질 온도를 25°C로 유지하고 레이저광의 공진이 매질 중심에서 이루어지는 것 보다 가로축 0.7~2.5 mm, 세로축 0.9~2.7 mm에서 이루어지도록 설계하면 열영향을 최소화시킬 수 있을 것이라 판단된다. 또한 매질에 입사되는 여기광을 균일하게 조사시킬 수 있는 집광기를 설계하고 매질과 집광기 사이에 일정한 간격을 두어 매질의 냉각이 균일하게 이루어지도록 하면 레이저 막대에서 일어나는 열영향을 최소화시킬 수 있을 것으로 보인다.

V. 결 론

반도체 레이저 측면 여기 Nd:YAG 매질에서 발생한 열영향을 Conoscope 법에 $\lambda/4$ 판을 삽입한 고감도 측정법으로 여기 파워와 매질 온도에 따라 측정하고 해석하였다.

반도체 레이저 여기 방법은 여기원의 발진파장과 레이저 매질의 파장 정합이 잘 이루어져 매질에서 생기는 열영향은 작게 일어난다. 따라서, 김광자와 편광자로 구성된 Conoscope 방법은 작게 일어나는 열복굴절 현상의 측정에 어려움이 있어 Conoscope 방법에 $\lambda/4$ 판을 삽입하여 열영향에 의한 미소 변화를 효과적으로 측정을 하였다. 또한 매질에서 탐침광의 변화를 CCD로 측정을 하여 열영향에 의한 매질 각 부분의 변화 상태의 해석이 가능하였다.

여기광은 약 21%가 매질에서 열로 변환되었고, 매질 온도 25°C에서 15 W로 여기시켰을 때 열영향에 의한 편광 왜곡량은 2~7%를 나타내었다.

매질에서 영역별 변화 상태는 냉각이 이루어지는 주변부에서 탐침광의 강도가 현격하게 줄어드는 현상이 나타났다. 여기광의 흡수가 이루어지는 매질의 가로축을 중심으로 매질 상·하 부분에서 탐침광의 강도가 서로 대칭적인 변화를 보이고, 중심 부분에는 탐침광이 모여지는 열렌즈 효과가 일어났다. 리타레이션 값도 중심부에서 7°와 주변 부분에서 최고 19°로 불균일한 분포를 나타내었다. 탐침광의 변화가 작게 일어난 부분은 가로축 0.7~2.5 mm, 세로축 0.9~2.7 mm였다. 따라서, 공초점 반사경을 사용하여 공진기를 구성하여 레이저 공진이 이 부분에서 이루어지게 하거나, 여러 방향에서 여기를 균일하게 시키면 매질의 굴절을 변화도 균일하게 되어 열영향을 최소화시킬 수 있을 것이다.

레이저 막대의 온도에 따른 열영향은 25°C에서 15 W로 여

기시킬 때 가장 작은 강도 변화를 보였고, 매질의 다른 부분의 변화는 심하게 일어나는데 반해 냉각이 되는 부분의 변화비가 일정함으로 보아 레이저 막대에서 고르게 냉각시켜야 한다는 것을 알 수 있었다.

매질의 굴절을 변화는 여기 방법과 매질의 온도 변화에 따라 다르게 나타날 것으로 생각된다. 여기 파워에 따른 열영향을 최소화시키기 위해 여기광이 레이저 막대에 균일하게 조사되도록 집광 반사경을 설계하고, 레이저 막대와 집광 반사경 사이에 일정한 공간을 두어 냉각을 고르게 시킨다면 열영향이 적게 일어날 것으로 판단된다.

본 연구는 반도체 레이저 측면 여기 Nd:YAG 매질에서 일어난 열영향을 측정·해석하였고, CCD를 이용한 매질 각 부분에서의 열영향에 대한 해석으로 열영향을 최소화시킬 수 있는 효과적인 방법을 제시하였다.

참고문헌

- [1] J. E. Murray and D. J. Kuizenga, "Regenerative Compression of Laser Pulses," *Appl. Phys. Lett.* 37, pp. 27, 1980.
- [2] R. A. Meyers, *Encyclopedia of Lasers and Optical Technology*, (Academic Press, Inc., San Diego, 1991)
- [3] W. Koechner, *Solid-state Laser Engineering*, (Springer-Verlag, Berlin, 1996)
- [4] S. Singh, R. G. Smith, and L. G. Van Uitert, "Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd³⁺ in yttrium aluminum garnet at room temperature," *Phys. Rev. B.* 10, pp. 2566, 1974.
- [5] G. P. Agrawal, *Semiconduction lasers*, (AIP Press, New York, 1995)
- [6] D. Welford, D. M. Rines, and B. J. Dinerman, *Opt. Lett.* 16, pp. 1850, 1991.
- [7] W. Seka, J. Soures, J. Bunkenburg, D. Brown, S. Jacobs, O. Lewis, G. Mourou, and J. Zimmermann, "High-power phosphate-glass laser system: design and performance characteristics," *Appl. Opt.* 19, pp. 409, 1980.
- [8] J. Zhang, M. Quade, Y. Liao, S. halter, K. Pu, and P. Loosen, "Polarization characteristics of a Nd:YAG laser side pumped by diode laser bars," *Appl. Opt.* 36, pp. 7725, 1997.
- [9] W. Koechner, and D. K. Rice, "Effect of Birefringence on the Performance of Linearly Polarized YAG:Nd Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* QE-6, pp. 557, 1970.

Thermal effect at Nd:YAG using a laser-diode side-pumping

Dong Ok Yang and Byung-Tai Kim[†]

Department of Laser & Optical Information Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, KOREA

[†]*E-mail: bikim@chongju.ac.kr*

(Received August 20, 2002, Revised manuscript December 18, 2002)

This paper describes the thermal effect at Nd:YAG using a laser-diode side-pumping. To detect the depolarization loss and the retardation caused by the thermal effect, a $\lambda/4$ plate is inserted between the polarizer and the Nd:YAG laser material. Using a CCD has allowed detection of the variation of the beam pattern that could analyze the change of the refractive index of the Nd:YAG laser material by the thermal effect. Through the change of the probe beam power, we know that 21% of the pumping power was converted into heat in the material. The depolarization loss was 24.7% under a temperature of 25°C of the laser material and a pumping power of 15 W. The inhomogeneous distribution showed that the retardation angle was 7° in the center of the material and 19° on the edge of it. It is confirmed that the thermal effect is analyzed at the each point of the laser material and it suggests an effective method to reduce the thermal effect on the LD side-pumped laser material.

Classification code : LO 080.