

## He-Ne 레이저 탐사광의 간섭효과를 이용한 Nd : YAG 레이저봉의 온도측정

김광석 · 공홍진

한국과학기술원 물리학과

김덕현 · 김철중

한국원자력연구소 전자광학연구실

(1990년 7월 2일 받음)

Nd : YAG 레이저봉을 이용한 간단한 간섭장치를 구성하여 단일펄스 및 고반복률 펄핑 후 레이저봉의 간섭효과에 의한 간섭무늬의 이동갯수를 이용하여 레이저봉의 온도를 측정하였으며, 간섭무늬의 시간적인 변화와 열확산 방정식을 풀어서 얻은 레이저봉의 온도와 비교하였다.

아울러 레이저봉에 누적된 열에너지의 공간분포와 정도를 측정하여 본 연구에서 사용된 금도금된 섬광관 펄핑 반사체에 의한 레이저봉의 펄핑 균일도 및 열전달률을 평가하였다.

### I. 서 론

고출력 및 고반복률로 동작하는 고체 레이저의 개발에 있어서 가장 중요한 설계변수는 섬광관 펄핑에 의한 레이저봉의 열에너지 문제이다. 냉각에 의한 레이저봉내의 온도구배나 펄핑반사체의 기하학적 구조에 따른 레이저봉내의 펄핑 불균일도 등은 고출력 레이저 발전을 방해하고 레이저 출력을 왜곡시키는 원인이 된다.

레이저봉내의 이러한 열적특성을 측정하기 위하여 실험 및 이론에 관한 많은 연구가 진행되었다. 레이저 개발 초기에는 단일펄스 펄핑 후 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 레이저봉의 온도변화에 따른 시간적, 공간적 광로정의 변화를 측정하는 방법이 시도되었다.<sup>(1-3)</sup> 그러나 이 방법은 레이저봉의 광학적 특성을 설명하는 간섭무늬의 변화에 대한 해석이 복잡하여 실제로 레이저를 설계하는데 이용하기 어려운 단점이 있어왔다. 한편, M.K. Chun<sup>(4)</sup> 등은 He-Ne 탐사광과 aperture 를 이용하여 레이저봉의 열렌즈 효과를 측정하는 실험을 하였으나, 레이저봉 내부의 온도분포는 측정하지 못하였다. W. K. Chner<sup>(5)</sup>와 U.O. Farrukh<sup>(6)</sup> 등은 열확산 방정식을 이용하여 섬광관 펄핑형태에 따른 레이저봉의 온도분포를 예측하는 이론적 연구를 하였고, 최근 K. Mann<sup>(7)</sup>

등은 레이저봉을 이용하여 보다 간단한 간섭장치를 구성하여 단일펄스 펄핑시 레이저봉의 표면열전달 상수를 측정하여 레이저봉의 온도분포를 계산한 바 있다.

본 실험에서는 Mach-Zehnder 간섭계와 고속 카메라로 구성된 장치 대신에 레이저봉과 1mm 구경의 aperture 에 의해 탐사광의 공간적인 이동이 가능한 간단한 간섭장치를 구성하여 단일펄스 및 고반복률로 펄핑한 후 이동하는 간섭무늬를 관찰하여 레이저봉 중심의 온도를 측정하였으며 열확산 방정식을 이용하여 얻은 값과 비교하여 신뢰도를 확인하였다. 레이저봉 온도의 이론적 계산을 위하여 단일펄스 펄핑 후 레이저봉 냉각에 의한 표면열전달 상수와 열전달률을 실험적으로 측정하여 사용하였다. 그리고 레이저봉에 누적된 열에너지의 공간분포를 측정하여 금도금된 섬광관 펄핑용 single elliptical 반사체에 의한 레이저봉 내부의 펄핑 균일도도를 측정하였다.

### II. 레이저봉의 온도 및 공간적인 열특성 측정 실험방법

섬광관에 의해 레이저봉이 펄핑될 때 레이저봉의 온도 변화는 그림 1의 실험장치에서와 같이 광로차 변화에 의

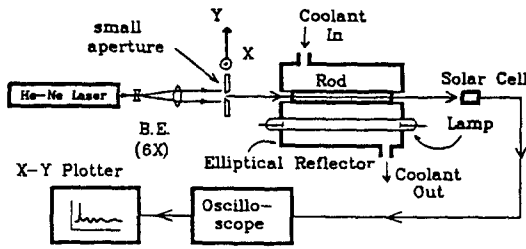


그림 1. 레이저봉의 온도측정을 위한 실험장치.

한 간섭무늬의 갯수를 측정하여 구하는 방법과, 레이저봉의 온도이완 시간을 측정하여 표면열전달 상수를 구하고 이 값을 이용하여 열확산 방정식을 계산하는 방법이 있다. 이 두 가지 방법은 서로 독립적이므로 두 가지 방법을 이용하여 구한 레이저봉의 온도를 비교하면 측정치의 신뢰도를 높일 수 있다.

**1. 간섭무늬의 변화를 이용한 레이저봉의 온도 측정방법**

섭광관에 의하여 그림 2와 같은 레이저봉을 고반복률로 펌핑한 후 냉각시키면 상승하였던 온도가 평형상태로 내려가면서 굴절률 변화 및 길이 변화가 발생한다. 이로 인해 레이저봉을 통과하는 He-Ne 레이저(파장 0.633 μm) 탐사광(probe beam) 중 레이저봉 끝면의 1.06 μm에 대한 무반사 코팅에 의하여 반사한 탐사광 1과 그대로 레이저봉을 통과하는 탐사광 2 사이에 광로차(OPD)가 변화되며 이 두 탐사광의 간섭에 의해 생긴 간섭무늬가 시간에 따라서 이동한다. 이 때 이동하는 간섭무늬의 갯수를 S 개 라면

$$S \cdot \lambda = 2\delta(nL) = 2\left[L \frac{dn}{dT} + n \frac{dL}{dT}\right] \delta T \quad (1)$$

λ : He-Ne 레이저 파장

δT : 고반복률 펌핑에 의한 레이저봉의 온도상승

L : Nd : YAG 봉의 길이

n : Nd : YAG 봉의 굴절률

이 되어 이동하는 간섭무늬의 갯수로부터 섭광관에 의한 고반복률 펌핑시 aperture가 위치한 레이저봉 내부의 온도상승 δT를 알 수 있다.

**2. 열확산 방정식을 이용한 레이저봉의 온도 측정방법**

섭광관으로 레이저봉을 광펌핑시키면서 냉각시킬 때 레이저봉 반경 방향으로의 일반적인 열확산 방정식은 다음과 같다.<sup>(8)</sup>

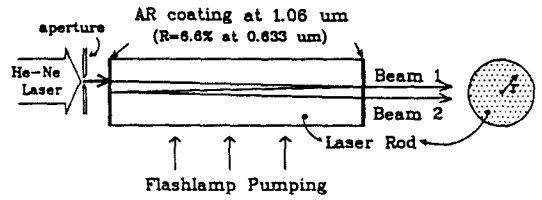


그림 2. Beam 1 과 Beam 2 에 의한 레이저봉의 간섭.

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = k \left[ \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{r \partial r} \right] + \frac{kQ}{K} = 0 \quad (2)$$

T(r, t) : 레이저봉의 위치 및 시간에 대한 온도

r : 레이저봉의 중심을 원점으로한 위치좌표

k : 열확산도

K : 열전도도

Q : 레이저봉에서 균일하게 발생하는 에너지 밀도 한편, 냉각에 의한 레이저봉 표면을 지나가는 열에너지의 흐름은 아래와 같다.

$$K \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=a} = -h [T(r, t) - T_f] \Big|_{r=a} \quad (3)$$

h : 레이저봉의 표면열전달 상수

T<sub>f</sub> : 냉각수 온도

(3)식의 왼쪽 항은 레이저봉 표면에서 중심과 표면의 온도차에 의해 레이저봉 반경방향으로 이동하는 열량이고, 오른쪽 항은 냉각수에 의해 레이저봉 표면에서 냉각되는 열량이다.

1) 표면열전달 상수를 실험적으로 구하는 방법

표면열전달 상수는 그림 1의 실험장치에서 단일펄스로 펌핑한 후 냉각시킬 때 레이저봉의 간섭효과에 의해 생긴 간섭무늬의 시간적 변화를 측정하여 구할 수 있는데 이는 식 (1)에서 보듯이 레이저봉 온도의 시간적인 변화와 같다.

레이저봉의 열전도도가 등방성이고 각종 열상수가 레이저봉의 온도변화에 무관하며 펌핑시키고난 직후를 t=0로 하였을 때 냉각에 의한 열확산 방정식은 (2)식에서 Q=0로 하면 되므로 (3)식을 이용하여 (2)식을 변수분리하여 풀면

$$T(r, t) = \sum C_n J_0(\beta_n \times r/a) \exp(-\beta_n^2 \times t/\Gamma) + T_f \quad (4)$$

A = ah/K : 냉각조건을 나타내는 무차원 계수

$\Gamma = a^2/k$  : 레이저봉의 열시간 상수

$J_0(\beta_n \times r/a)$  : 0- 차 Bessel 함수

이 되며 (4)식에서의  $\beta_n$ 은 (3)식을 만족하는

$$\frac{d[J_0(\beta_n \times r/a)]}{dr} + \frac{h}{K} J_0(\beta_n \times r/a) |_{r=a} = 0 \quad (5)$$

방정식의 해가 된다.<sup>(5)</sup>

(4)식에서  $n$ 이 커짐에 따라  $|C_1| > |C_2|, \dots$ 이며<sup>(7)</sup> (5)식에서  $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3, \dots$ 이므로 (4)식에서의 시간에 관계한 지수부분도 급속히 작아지므로  $n=2$  이상의 항을 무시하는 근사를 취했다. 따라서 (4)식과 (5)식은 각각

$$T(r, t) = C_1 \times J_0(\beta_1 r/a) \exp(-\beta_1^2 t/\Gamma) + T_r \quad (4')$$

$$\beta_1 J_1(\beta_1) = ah/K \cdot J_0(\beta_1) \quad (5')$$

이 되므로 섬광관 펄핑 후 레이저봉의 온도이완시간  $\Gamma/\beta_1^2$ 을 측정하면 (5')에서 표면열전달 상수  $h$ 를 알 수 있다. 펄핑에 의해 이동하는 간섭무늬의 전체 갯수를  $S$ 개라고 하고  $t$ 초 동안 이동한 갯수를  $G$ 개라고 하면

$$t = (\Gamma/\beta_1^2) \times \ln(S/(S-G)) \quad (6)$$

관계가 성립하며 각각의  $G$ 에 대한 시간  $t$ 를 구한 다음 최소자승법을 이용하여 (6)식의 기울기인 온도이완시간  $\Gamma/\beta_1^2$ 을 구하면 된다.

2) 고반복률 펄핑의 경우 레이저봉의 온도계산

본 논문에서는 고반복률의 펄핑인 경우 펄스 반복률이 수십 pps(pulse per second)에 달하는 경우 레이저봉의 온도이완 시간에 비하여 펄핑 펄스간의 시간간격이 매우 짧으므로 연속펄핑(CW)과 같이 취급하였다.

연속펄핑의 경우 (2)식에서  $\partial T(r, t)/\partial t = 0$ 이므로 (3)식을 이용하여 (2)식을 풀면 레이저봉의 온도분포  $T(r)$ 은

$$T(r) = T_r + \frac{P}{2\pi aL} \left[ \frac{(a^2 - r^2)}{2Ka} + \frac{1}{h} \right] \quad (7)$$

$a$  : 레이저봉의 반경

$L$  : 레이저봉의 길이

$P$  : 광펄핑에 의하여 레이저봉에서 발생하는 power =  $\pi a^2 L Q(r)$  (Watt)

이 된다. 따라서 1)항에서 측정된 표면열전달 상수  $h$ 와 열전달률 측정에 의해 구할 수 있는  $P$ 를 알면 고반복률로 펄핑할 때의 레이저봉의 온도를 계산할 수 있다.

### 3. 레이저봉의 공간적인 펄핑 불균일도 및 열전달률 측정방법

그림 3과 같이 레이저봉의 중심을 원점으로 aperture의 위치를 이동시키면 레이저봉의 공간적인 온도분포를 구할 수 있다.

단일펄스 펄핑에 의하여 단위시간당 레이저봉에 누적되는 열에너지 밀도  $Q$ 는 다음과 같이

$$Q(r) = mC \delta T(r) \quad (\text{Watt}) \quad (8)$$

$m$  : 레이저봉의 질량

$C$  : 레이저봉의 비열

된다. 따라서 aperture의 위치에 따른 간섭무늬 갯수의 변화를 측정하면 (1)식에 의해  $T(r)$ 을 알 수 있고 펄핑 반사체에 의한 레이저봉의 공간적인 펄핑 불균일도를 측정할 수 있다.

이 때 섬광관에서 레이저봉에 공급하는 에너지를  $W$ 라고 하고 섬광관에서 공급되는 에너지 중 레이저봉에 누적되는 열에너지의 비율, 즉 상대적으로 펄핑 반사체의 섬광관 에너지 전달효율을  $\phi(r)$ 라 하면

$$\phi(r) \equiv Q(r) \cdot V/W \quad (9)$$

$V$  : 레이저봉의 부피이다.

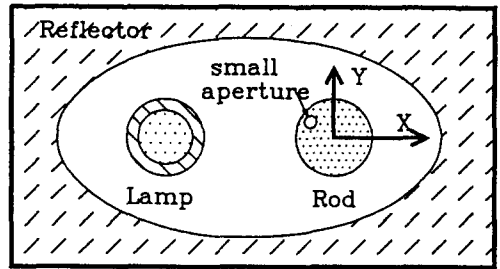


그림 3. Aperture의 위치이동에 의한 레이저봉의 공간적인 열에너지 분포 측정.

표 1. Nd : YAG 레이저봉의 물리적 상수.

Mass density (m)	: 4.55 g/cm <sup>3</sup>	[5]
Specific heat (C)	: 0.59 Ws/g/K	[5]
dn/dT	: 7.3 × 10 <sup>-6</sup> /K	[9]
dL/LdT	: 7.5 × 10 <sup>-6</sup> /K	[9]
Refractive index (n)	: 1.82 at 1.06 μm	[9]
Thermal diffusivity (k)	: 0.048 cm <sup>2</sup> /sec	[5]
Thermal conductivity (K)	: 0.13 W/cm/K	[5]

표 2. 본 연구에 사용된 실험장치의 수치.

Nd:YAG rod	: L = 152 mm, D = 6.4 mm
Rod jacket tube	: OD = 15 mm, ID = 13 mm
Flashlamp	: Arc L = 150 mm, ID = 7 mm
He-Ne laser	: Max. 5 mW
Beam expander	: M = 6 X
Aperture	: D = 1 mm
Detector	: Solar cell
Oscilloscope	: Digital, 175 MHz
Flowmeter range	: Max. 7 $\mu$ /min

본 논문에서 측정 및 계산에 사용한 Nd:YAG 레이저봉의 각종 물리적 상수 및 실험장치의 수치가 표 1과 2에 각각 요약되었다.

### III. 실험결과 및 토의

#### 1. 레이저봉의 온도측정

그림 4는 단일펄스 펌핑 후 ( $t=0$ ) 레이저봉을 냉각시킬 때 레이저봉의 간섭효과에 의한 간섭무늬의 이동을 보여주는 실험결과이다.

먼저 빠른 반복률로 동작하는 pulse 형 레이저의 평균적인 레이저봉 온도를 계산하기 위하여 레이저봉의 온도이완 시간을 측정된 결과가 그림 5의 (a)에 나타나 있다. 냉각수 유량이 증가함에 따라 온도이완 시간이 짧아지는 것을 보여주고 있다.

그림 5의 (b)는 온도이완 시간과 식 (5')을 이용하여 측정된 표면열전달 상수의 측정치와  $Hsu^{(10)}$  등의 이론에 따라 계산한 표면열전달 상수의 이론치를 서로 비교한 것이다. 실험은 층류와 난류의 중간영역에서 수행되었으며 측정치  $h$ 가 중간영역에서 이론적으로 계산한 값 사이에 위치하는 것을 보여주고 있다.

그림 5(c)는 측정된 열전달 상수와 식 (7)을 이용하여 1kW 입력시 레이저봉 중심온도를 계산한 것과 실제로 1kW 입력을 15pps로 펌핑할 때 이동하는 간섭무늬의 갯수를 세어 측정된 레이저봉 중심온도를 비교한 것으로 서로 다른 두 가지 방법을 이용하여 측정된 결과이다. 본 실험에서 1kW 입력으로 레이저봉의 중심온도만을 측정할 이유는 실제로 수 kW 이상의 입력으로 레이저봉을 펌핑시킬 때의 중심온도 측정은 이동하는 간섭무늬의 갯수가 수백개 이상이되어 오실로스코프를 이용한 본 실험장치로는 측정하기 곤란하였기 때문이며 레이저봉의 중심부에서 떨어진 곳의 측정도 레이저봉의 열렌즈 효과 때문에 탐사광이 굵어 측정하기가 곤란하였기 때문이다.

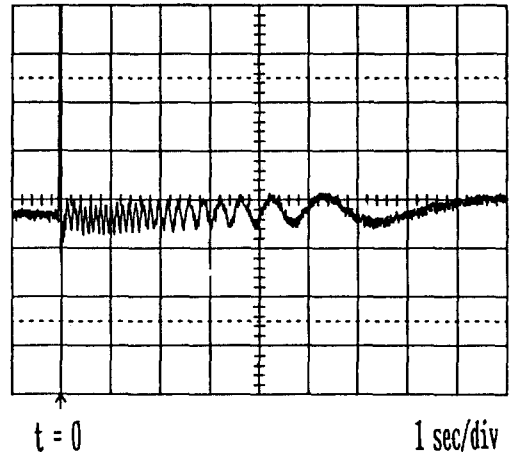


그림 4. 레이저봉의 온도변화에 따른 간섭무늬의 시간적인 변화( $t=0$ : 펌핑, time scale: 1 sec/div).

따라서 높은 입력으로 펌핑할 때의 레이저봉 온도분포는 표면열전달 상수  $h$ 와 열전달률  $\phi$ 를 측정하여 수 kW 입력으로 펌핑되는 레이저봉의 온도를 산출하는 방법으로 예측하였다. 그림 5(c)의 결과에 의하면 1kW 입력에서 분당 7리터의 냉각수를 흘렸을 때 간섭효과에 의해 측정된 레이저봉의 중심온도 상승이 약 3.5°C이므로 내경이 7mm 방전길이가 6인치인 섬광관의 최대입력인 6.5kW로 펌핑할 때의 레이저봉 중심온도 상승은 1kW 입력의 6.5배로 약 23°C이며 표면온도 상승은 11°C임을 알 수 있다.

#### 2. 레이저봉의 공간적인 열특성 측정

펌핑 반사체에 의한 레이저봉내의 공간적인 펌핑 균일도를 측정하기 위하여 탐사광을 이동시키는데 직경이 1mm인 aperture를 사용하였다.

섬광관의 전류 펄스폭을 증가시켜 입력에너지를 변화시켜가며 레이저봉에 누적된 열에너지의 X, Y 축 방향 공간분포를 측정된 결과가 그림 6(a), (b)에 나타나 있다. 이 결과에 의하면 레이저봉의 섬광관쪽 부분이 상대적으로 강하게 펌핑되고 있음을 알 수 있으며 레이저봉의 표면이 중심부보다 섬광관 에너지의 흡수가 큰 것을 알 수 있다. 측정된 펌핑의 불균일도(레이저봉의 중심을 기준으로)는 약 20% 내외였으며 이와 같은 결과는 레이저 출력 beam intensity의 공간적인 균일도를 예측하는데 참고가 될 수 있을 것이다.

펌핑 반사체의 레이저봉에 대한 열전달률은 전술한 식

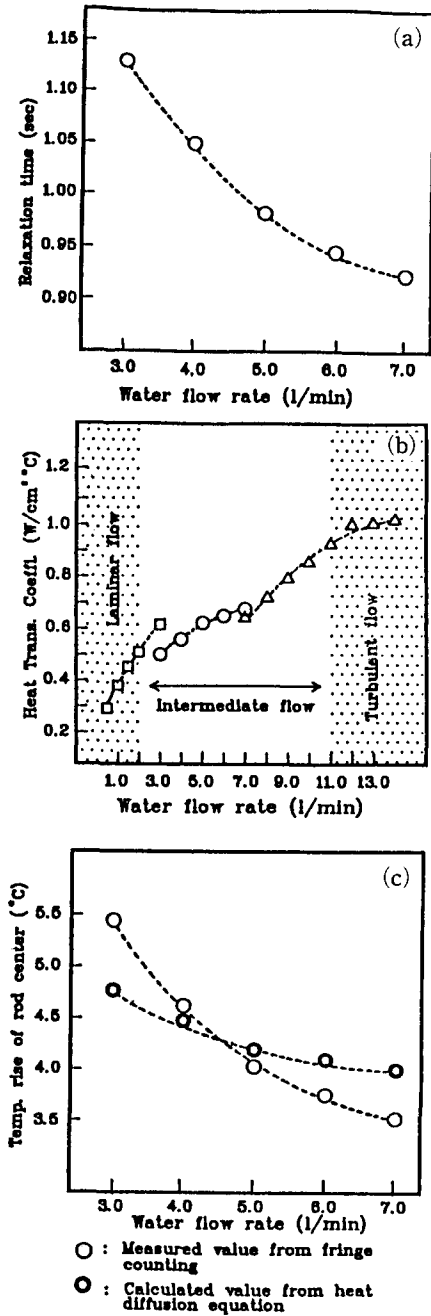


그림 5. (a) 냉각수 유량의 변화에 따른 레이저봉의 온도이완 시간의 변화. (b) 냉각수 유량의 변화에 따른 레이저봉의 표면열전달 상수의 변화. □ : 층류(laminar flow) model에 의한 이론치, ○ : 실험치, △ : 난류(turbulent flow) model에 의한 이론치. (c) 레이저봉 중심온도의 이론치와 실험치의 비교.

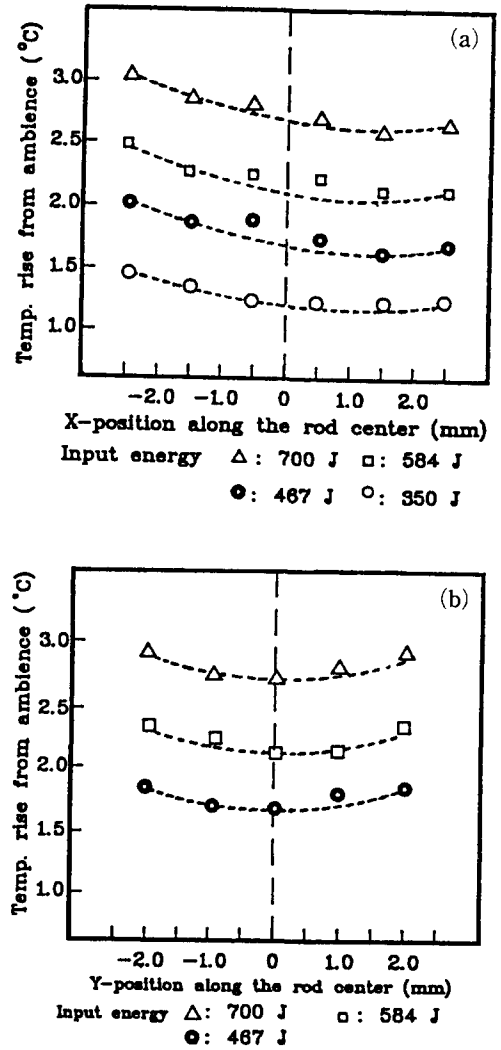


그림 6. (a) 단일펄스 펌핑시 레이저봉의 X 축(flashlamp 축) 방향에 대한 온도분포. (b) 단일펄스 펌핑시 레이저봉의 Y 축 방향에 대한 온도분포.

(1, 8, 9)으로 계산할 수 있으며 그림 6의 결과를 이용하여 계산하여 보면 대략  $\phi = 4.8 \pm 0.5\%$  정도의 섬광관에 에너지가 레이저봉에서 열로 변화하였음을 알 수 있었다. 열전달률은 섬광관의 사용정도, 반사체의 에너지 집광효율, 반사체의 표면반사율 등에 의해 결정되므로 위와 같은 열전달률을 측정하므로서 같은 금도금 반사체의 에너지 집광효율을 평가할 수 있음을 보여주고 있다.

IV. 결 론

참 고 문 헌

본 실험에서 aperture와 레이저봉의 간섭현상을 이용하여 고출력 Nd:YAG 레이저 개발에 중요한 레이저봉의 온도와 레이저봉의 공간적인 pumping 분포, 섬광관 에너지의 레이저봉 전달률 등을 측정 분석하였다.

고반복률로 펌핑한 후 간섭무늬의 이동 갯수를 측정하여 레이저봉의 온도를 구하였으며, 냉각시 레이저봉의 표면열전달 상수를 이용하여 구한 레이저봉의 온도와 비교하여 측정치의 신뢰도를 높였다. 그리고 실제 측정하기 어려운 고출력 레이저 발전시 레이저봉의 온도예측이 가능함을 알았다.

아울러 본 실험에서 단일펄스 펌핑에서 펌핑반사체에 의한 레이저봉의 공간적인 펌핑 불균일도 및 열전달률을 측정할 수 있었으며 이와 같은 방법을 이용하여 같은 재질로된 고효율 펌핑반사체의 설계에 대한 검증용 할 수 있음을 보여 주고 있다.

[1] S. Sims, A. Stein, C. Roth, Appl. Opt. 5, 621 (1966).  
 [2] H. Welling and C.J. Bickart, J. Opt. Soc. Am. 56, 611 (1966).  
 [3] E. Riedel and G. Baldwin, J. Appl. Phys. 38, 2720 (1967).  
 [4] M. K. Chun and J. T. Bischoff, IEEE J. Quantum Electron. 7, 200 (1971).  
 [5] W. Koehler, J. Appl. Phys. 44, 3162 (1973).  
 [6] U. O. Farrukh, A. M. Buoncristiani and C. E. Byvik, IEEE J. Quantum Electron. 24, 2253 (1988).  
 [7] K. Mann and H. Weber, J. Appl. Phys. 64, 1015 (1988).  
 [8] H. S. Carslow and J. C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids (Oxford U.P., Oxford, 1959) Chap. 7.  
 [9] W. Koehler, Solid State Laser Engineering (Springer-Verlag, New York, 1976) Chap. 7.  
 [10] S. T. Hsu, Engineering Heat Transfer (Van Nostrand, Princeton, N.J., 1963) Chap. 9.

**Measurement of the Thermal Behavior of a Nd:YAG Laser Rod by Analyzing Inteferece Fringe from a He-Ne Probe Beam**

Kwang Suk Kim and Hon Jin Kong

*Department of Physics Korea Advanced Institute of Science and Technology Chongyang  
 P.O. Box 150, Seoul, Korea*

Duk Hyeon Kim and Cheol Jung Kim

*Electro-Optics Department Korea Atomic Energy Research Institute  
 KAERI P.O. Box 7, Dae-Duk Science Town, Taejeon, Korea*

(Received: July 2, 1990)

The temperature variation at a laser rod center induced by high repetetion rate pumping was measured by counting the number of inteferece frigne shift and found to be consistent with the theoretical value obtained from heat diffusion equation.

The spatial homogeneity and energy transfer rate of flashlamp pumping by the single elliptical reflector plated with gold were evaluated by measuring interference fringes oever the cross section of a Nd:YAG laser rod.