

モアレ法によるアレキサンドライトレーザーロッドの熱レンズ効果の測定

Measuring the thermal lens effect of Alexandrite laser rods by Moire deflectometry

武 瑞 成*・黒 田 和 男*・伊 藤 雅 英*・小 倉 磐 夫*

Rui Cheng WU, Kazuo KURODA, Masahide ITOH and Iwao OGURA

1. は じ め に

アレキサンドライトレーザーは波長可変 (701~826 nm) の高出力固体レーザーであり、広い分野で応用が期待されている。とくに波長可変性を利用した光化学や分光などへの応用が研究されている。固体レーザーの設計、評価において、固体レーザー媒質の熱レンズ効果は重要な要素の1つである。レーザーロッドがその周囲から光ポンピングで励起されるとき、ロッドで発生する熱は空間的に一様ではなく、温度分布が生じ、熱伝導が起こる。ロッド内の温度分布は軸対称とみてよい。一方、媒質の屈折率は温度の関数であるから、屈折率 $n(r, t)$ は空間的、時間的に変化する。半径 r 方向の n の分布によって、光軸方向の光線に対しレンズ効果が発生する。これを熱レンズ効果という。熱レンズの焦点距離 f はロッドの吸収率、熱伝導率、直径、長さ、励起条件、冷却条件などのパラメータによって決まる。われわれはモアレ法を用いて、フラッシュランプに丸く囲まれた、空気冷却のアレキサンドライトレーザーロッドの熱レンズ効果を測定した。

2. 原 理

モアレ偏向法は格子のモアレパターンを使って、感度よく、光線の偏向を測定する簡単な方法である。ピッチ p の2枚の格子を間隔 Δ だけ離して、ほぼ平行に置き、光を入射させると、前の格子の影が後の格子に当たって、

モアレパターンが生じる (Fig 1)。間隔は第1の格子のフーリエ像の位置、すなわち $\Delta = p^2 m / \lambda$ ($m = 1, 2, 3, \dots$) ととる。ただし、 λ は光の波長である。平行光線が入射したときは直線状のモアレ縞ができる。光線がレンズ効果をもったレーザーロッドを通過するときは、モアレ縞が変化する。もし2つの格子を正確に平行に置けば、モア

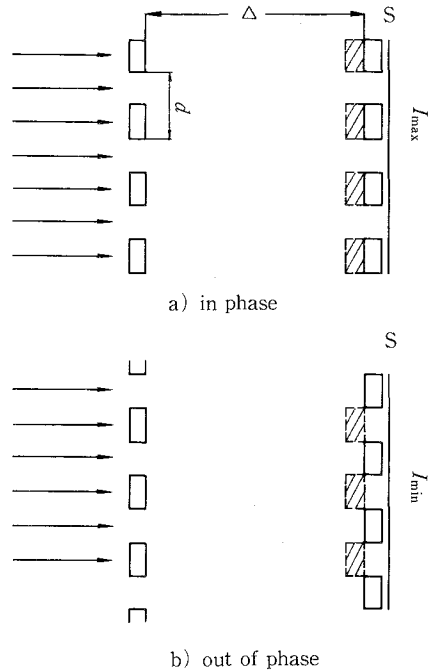


Fig 2 Two configurations of the infinite fringe Moire deflectometer

- a) In phase : where 50% of the light passes. The transmission intensity on the screen is maximum
- b) out of phase : in which no light can be transmitted. The transmission intensity on the screen is minimum.

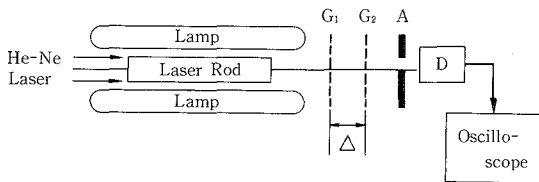


Fig 1 Experimental setup for measuring thermal lensing of Alexandrite laser rod

*東京大学生産技術研究所 第1部

研 究 速 報
レパターンは強度が均一のものになる^{1,2)}。Fig 2 のように 2 つの格子が同位相であるとき、光の透過強度は最大になる、逆相になると光の透過強度は最小になる。

格子の相対シフトを y と置くと、シフト y が変化するにつれて、光の透過強度 I は最大値 I_{max} と最小値 I_{min} の間を式 (1) に従って直線状に変化する。

$$I = I_{max} - (2y/p)(I_{max} - I_{min}), \quad 0 \leq y \leq \frac{p}{2} \quad (1)$$

Fig 3 にシフト y に対する鋸歯状の透過強度 I を示す。入射光線が励起したレーザーロッドを通過する際、熱レンズ効果によって発散あるいは集れんするが、レンズは通過する光束に対し、入射高に比例する偏向を与えるから透過光の強度は (1) 式に従って変化する。ただし、光線の偏向角度 ϕ と格子のシフト y は次の関係にある。

$$y = \phi \Delta \quad (2)$$

最初に 2 つの格子の相対シフト y を $p/4$ に調整しておく、光の透過強度 $I_{p/4}$ は

$$I_{p/4} = (I_{max} + I_{min}) / 2 \quad (3)$$

になる。熱レンズの焦点距離を f とすれば、光線偏向角 ϕ は熱レンズのパワーに比例する。すなわち、 $\phi \approx h/f$ 。ただし、 h は光線の高さ。式 (2) と式 (1) により

$$I = I_{max} - 2h/f(\Delta/p)(I_{max} - I_{min}) \quad (4)$$

となる。格子の後に開口を置き、それを通過する平均強度を求める。もし開口が軸対称であると光軸の上下で符号が異なるので、全体としての変化は見られない。そのことを避けるために、半径 r の半円状の開口を使う。その開口を通過した光の平均強度の変化 ΔT は

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{1}{\pi r^2} \int_0^\pi d\theta \int_0^r [I(h) - I(p/4)] r dr \\ &= \frac{4}{3\pi f} r(\Delta/p)(I_{max} - I_{min}) \end{aligned} \quad (5)$$

で与えられる。この式から、システムの透過率の変化 $\Delta T / (I_{max} - I_{min})$ を測定することによって、熱レンズの焦点距離 f の大きさと符号を求めることができる。

3. 測 定 の 装 置

モアレ偏向法を使って、アレキサンドライトレーザーロッドの熱レンズの焦点距離を測定する装置を Fig 1 に示した。He-Ne レーザービームを拡大し、アレキサンドライトレーザーロッドを通過させ、平行光とする。ロッドの軸は結晶の c 軸に合っている。レーザーロッドは Xe フラッシュランプによって励起される。放電回路の容量とインダクタンスは $C=280 \mu\text{F}$ 、 $L=10 \mu\text{H}$ であり、ランプの励起パルス幅 (FMHM) は $300 \mu\text{s}$ 程度であった。レーザーロッドは空気冷却される。格子のピッチ $p=84.6 \mu\text{m}$ 、間隔 Δ は 2.2 cm にとった (次数 $m=$

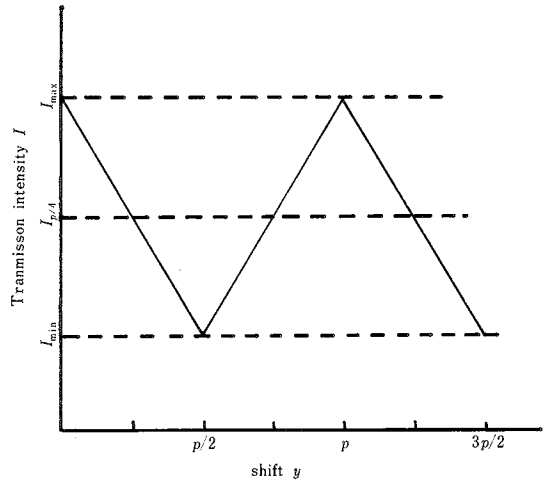


Fig 3 Transmission intensity as a function of relative grating shift

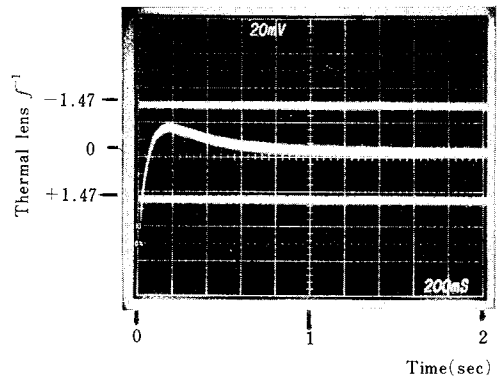


Fig 4 Transient thermal lens strength ($1/f$) of the Alexandrite laser rod of $10 \times 60 \text{ mm}$, Cr^{3+} density of which is $0.035 \text{ at}\%$

2). 強度の均一なモアレパターンが得られるように、2 つの格子を調整した。透過強度が $(I_{max} + I_{min}) / 2$ になるまで後の格子を移動した。格子の後に半径 $r=3 \text{ mm}$ の半円開口を置き、開口を透過した光の光量を大面积のフォトダイオードで受けた。低い繰り返し率でレーザーロッドを励起し ($0.67 \text{ パルス}/\text{min}$)、ロッドの熱レンズ効果による光量の時間的な変化をオシロスコープで測定した。

4. 結 果 と 討 論

3 つのアレキサンドライトレーザーロッドの熱レンズ効果を測定した。1 番目のロッドは Cr^{3+} の濃度 0.035

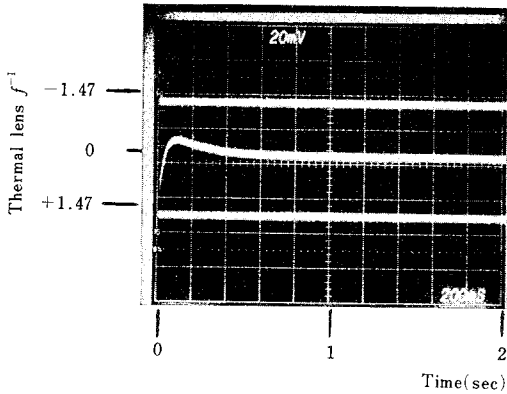


Fig 5 Transient thermal lens strength(1/f) of the 10×60mm Alexandrite laser rod, Cr³⁺ density of which is 0.07at%.

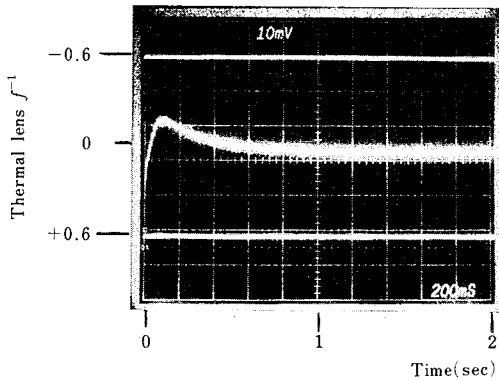


Fig 6 Transient thermal lens strength(1/f) of 5×60mm Alexandrite laser rod, Cr³⁺ density of which is 0.07at%

at%, 直径 10 mmφ, 長さ 60 mm のものである。入力を変えて測定したが、Fig 4 に入力が 1180 J のときの結果を示す。ポンピングの直後、熱レンズ効果によって、ロッドは凹レンズになり、急激にパワーが増加し、励起のあと 100 ms のところにピークが生じた。その後、熱レンズのパワーは減少に転じ、励起の後 1.8 s でゼロに戻った。式(5)を使って計算した結果、ピークにおける熱レンズの焦点距離 f は $f = -1.34\text{m}$ であった。

2番目のロッドはCr³⁺の濃度0.07at%、直径10mmφ、長さ60mmのものである。前と同じ装置で測定したが、その一例を Fig 5 に示す。入力は 678 J である。励起のあと 80 ms のところに熱レンズのパワーがピークに達した。ピークの焦点距離 f は -2.74m である。

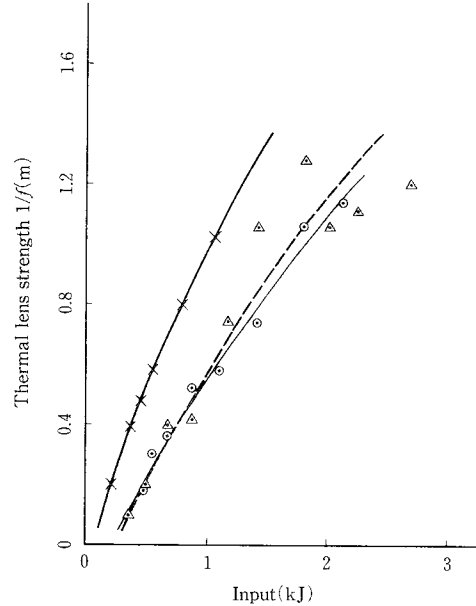


Fig 7 Thermal lens strength(1/f) as a function of lamp input energy for three laser rods. X and thick line for 5×60mm, Cr³⁺ density 0.07at% laser rod; O and thin line for 10×60mm, Cr³⁺ density 0.07at% laser rod; Δ and broken line for 10×60mm, Cr³⁺ density 0.035at% laser rod

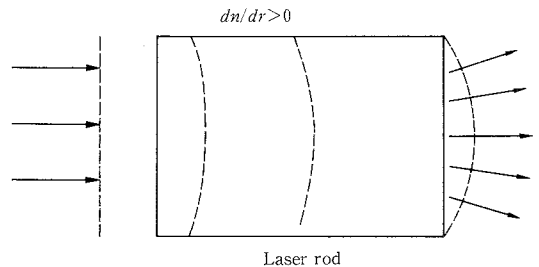


Fig 8 Sketch of the generation of the thermal divergent lens when the surface temperature of the rod is higher than its center temperature($dn/dr > 0$)

3番目のロッドはCr³⁺の濃度0.07at%、直径5mmφ、長さ60mmのものである。システムの感度を高めるために入力が低いときは、格子の間隔 Δ を 5.5 cm に変えた。そのほかは前とまったく同じであった。入力が高く、熱レンズ効果が大きい状態では Δ を 2.2 cm に戻した。Fig 6 に低入力のときの一例を示す。入力は $E = 202\text{J}$ 、最大の熱レンズの焦点距離は $f = -4.9\text{m}$ である。励起のあと 1 秒で熱レンズのパワーは 0 になった。

研究速報

3つのロッドの熱レンズのパワーの励起入力に対するグラフを Fig 7に示す。それらの図から3つのロッドの熱レンズはすべて凹レンズであること、入力エネルギーに比例して、熱レンズが大きくなることがわかった。われわれの測定では0.035 at%と0.07 at%の濃度の異なるロッドについて、熱レンズ効果はあまり差がなかった。5 mmφの細いロッドの熱レンズ効果は10 mmφのロッドのより大きい。これはロッドの表面の単位面積当たりの励起光量は径の細いほうが高く、したがって、表面の温度が高くなるからである。われわれの場合は励起中とその直後に断面内の温度分布は表面の温度のほうが中心の温度より高くなっている。熱は表面から中心に向かって伝導する。アレキサンドライトはルビーと同じように温度が高いほど、屈折率 n は高くなる。Wallingらの測定によると

$$\frac{dn}{dT} = \begin{cases} 9.4 \pm 0.5 & E//a \text{ 軸} \\ 8.3 \pm 0.5 & E//b \text{ 軸} \end{cases} \times 10^{-6}/K$$

である³⁾。平行光線がそのようなロッドを通過すると Fig 8のように波面が曲がり、凹レンズとなる。一方、循環水でロッドを冷却した場合は、最初は凹レンズとなるが、冷却の結果、温度分布が逆転し、凸レンズに変化する^{1,4)}。

固体レーザー媒質の熱レンズ効果は媒質の熱的性質、

形状、励起条件、冷却条件などのパラメータによって決まることである。

以上をまとめてみると、モアレ偏向法は以下の特徴があることがわかった。

- (1) 熱レンズのパワーが測定できること
- (2) 凸、凹レンズの区別ができること
- (3) 熱レンズの時間的な変化が測定できること
- (4) 装置の感度を Δ を変えて調節できること
- (5) 周囲の環境の振動などの影響を受けにくい
- (6) 簡単で取り扱いが容易である

すなわち、モアレ偏向法は熱レンズ効果の測定にたいへん有効であると結論できる。

(1986年10月29日受理)

参考文献

- 1) L. Horowitz, Y. B. Band, O. Kafri, and D. F. Heller : Appl. Opt. **23** (1984) 2229
- 2) O. Kafri, A. Livrat, and E. Keren : Appl. Opt. **21** (1982) 3884
- 3) J. C. Walling, D. F. Heller, H. Samelson, D. J. Harter, J. A. Pete, and R. C. Morris : IEEE J. Quantum Electron, **QE-21** (1985) 1568
- 4) M. K. Chun and J. T. Bischoff ; IEEE J. Quantum Electron, **QE-7** (1971) 200

