

トリプルパルス Nd:YAG レーザのロッド温度変化

数値シミュレーション解析

柴田 泰邦¹, 長澤 親生¹, 阿保 真¹

¹東京都立大学 (〒191-0064 東京都日野市旭が丘 6-6)

Triple-Pulse Nd:YAG laser to pump the 1.6 μm OPG transmitter for low power three-wavelength DIAL

Yasukuni SHIBATA¹, Chikao NAGASAWA¹, and Makoto ABO¹

¹Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: We present a numerical simulation analysis of temperature variations in Nd:YAG laser rods under triple-pulse burst mode operation. This is a problem that must be solved in order to perform high accurate CO₂ concentration measurements under the situation with moving aerosol and thin cloud layers by using the CO₂-DIAL system with low-energy and low-repetition pulse rate. The Nd:YAG laser, operating at 33.3 Hz in burst mode with triple-pulse emission, was modeled to assess thermal distortions. Simulations showed that a rod diameter of 7.0 mm maintains temperature stability within 0.1°C during pulse intervals, significantly reducing the impact of thermal lensing across pulses. Conversely, smaller rod diameters exhibited greater sensitivity to temperature fluctuations, resulting in degraded thermal lensing effects.

Key Words: CO₂, Temperature, OPG, DIAL, Triple-pulse

1. はじめに

二酸化炭素(CO₂)濃度分布の高精度観測を目的に、気温同時観測を可能とする 3 波長差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) を開発した^{1,2)}。光源にはパルス繰り返し 400 Hz の LD 励起 Nd:YAG レーザ(1064 nm)で励起される OPG (Optical Parametric Generator)を用いている。現在は定点観測のみ行っているが、可搬型の DIAL システムを新たに開発することで、工場や火力発電所など、局所的に CO₂を多く排出する場所でのモニタリングにも活用が期待できる。CO₂ 観測において、エアロゾル分布の変動が測定精度に影響するため、波長間のインターバルを極力短くしたバーストモードで発振する、小型で低消費電力の低繰り返しトリプルパルス OPG の開発を検討している³⁾。Nd:YAG を励起する際に熱が発生するが、バーストモードで発振させるとパルス列のインターバルで冷却が進み、熱ひずみを引き起こす恐れがある。さらに、3 つのパルス発振時のロッド温度が異なると、熱レンズ効果が 3 つのパルス光で異なり OPG 励起時に支障をきたす恐れがある。そこで、トリプルパルス発振時の Nd:YAG レーザロッドの温度変化を数値シミュレーション解析することで、熱ひずみの少ない Nd:YAG 光源の実現を目指す。

2. トリプルパルス OPG 光源

CO₂濃度と気温の観測においてエアロゾル変動の影響を抑えるには、3 波長のパルス時間間隔を 2 ms 以内にするのが望ましい。通常のレーザは一定の繰り返し周波数でパルスを発生させるが、バーストモードレーザは繰り返し周波数が低く、その代わりにバースト(一括)として複数のパルスをまとめて発生させる。パルス間隔が不均一になるので励起過程に伴う熱が短時間に集中する一方、パルス群のインターバルで冷却が進むことによって、共振器内に熱的なひずみが起きやすくなるのが想定される。

励起に伴うレーザロッドの温度分布 $T(r, z, t)$ は、以下の円筒座標系の熱微分方程式で求めることができる⁴⁾。

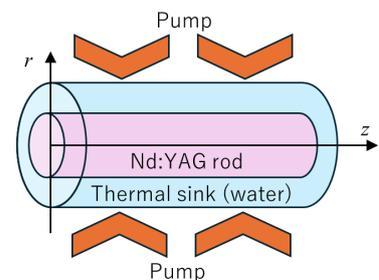


Fig.1 Side pumped laser rod with cylindrical heat sink for cooling

$$\rho c_p \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} - K_c \nabla^2 T(r, z, t) = Q(r, z, t) \quad (1)$$

ここで、 ρ はロッド密度[kg/m³]、 c_p は比熱[J/kg·K]、 K_c は熱伝導率[W/m·K]、 $Q(r, z, t)$ は熱源密度[W/m³]である。LD 励起 Nd:YAG は Fig.1 に示すサイドポンプ型を想定しているので、 $Q(r, z, t)$ は次式で表せる。

$$Q(r, z, t) = \begin{cases} \frac{\xi P_{pump}(t)}{S} \alpha e^{-\alpha r} & : \text{励起光照射領域内} \\ 0 & : \text{励起光照射領域外} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 ξ は励起光の熱変換率、 $P_{pump}(t)$ は励起光の時間波形、 α は励起光の吸収係数である。以下の条件のもと、レーザロッドの温度分布の時間変化を数値計算した。励起 LD は 33.3Hz のバーストモードでトリプルパルス発振している (Fig.2 中段参照)。各 LD パルスの発光時間は 200 μ s、ピークパワーは 600 W とした。励起光はレーザロッドに均一に照射されているものとする。また、レーザロッドは 15°C (288.15 K) の循環水で常時冷却されているものとする。Nd:YAG の各パラメータは、 $\rho = 4.56$ g/cm³、 $c_p = 0.59$ J/g·K、 $K_c = 10.46$ W/m·K、 $\alpha = 114$ m⁻¹、 $\xi = 0.35$ である。

Fig.2 にロッド径 2.0 mm における径方向の時間-温度分布 (上段)、LD 励起パルス (中段)、 $r = 0$ における温度分布 (下段) を示す。Fig.2(a)は励起開始から 2.0 秒まで、Fig.2(b)は励起開始から 0.2 秒までを拡大して示している。Fig.2(a)より、0.3 秒経過後はロッド温度が 5°C 程度の上昇で定常状態へと移行した。また、パルス群のインターバル時に 2°C 近く温度が低下していることが分かり、加熱及び冷却に対して敏感であることがうかがえる。また、Fig.2(b)より、トリプルパルスの各パルス発振時のロッド温度は 0.3~0.4°C 異なっていることも分かる。Fig.2(c)に熱レンズに伴う焦点距離の時間変化を示す。パルス列ごとの温度の違いはロッド温度が定常状態になっても続いており、パルス列ごとに熱レンズ効果が異なることが分かる。

Fig.3 にロッド径 7.0 mm における径方向の時間-温度分布 (上段)、LD 励起パルス (中段)、 $r = 0$ における温度分布 (下段) を示す。Fig.3(a)は励起開始から 2.0 秒まで、Fig.3(b)は励起開始から 0.2 秒までを拡大して示している。Fig.3(a)より、2 秒経過前後でロッド温度は 15°C 程度上昇して定常状態へと移行し、パルス群のインターバル時の温度変化はほとんど見られない。また、Fig.3(b)より、トリプルパルスの各パルス発振時のロッド温度変化は小さく、定常状態ではほぼ無視できる。以上のことから、ロッド径が大きくなると、加熱・冷却に対して鈍感になり、パルス列ごとのレンズ効果の違いは無視できることが分かった。

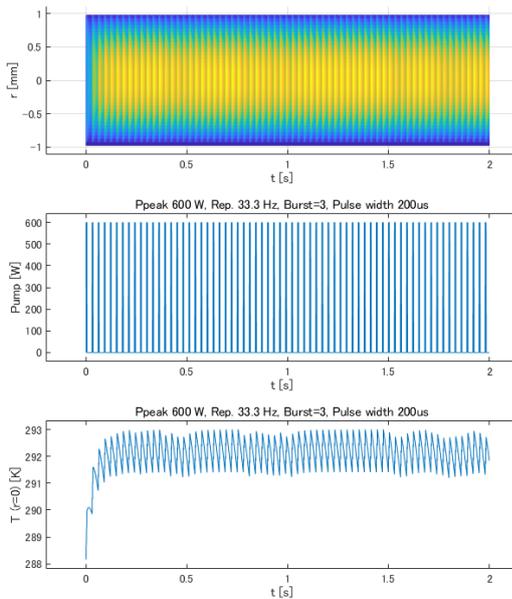


Fig.2 (a) Top: Temperature distribution in laser rod of 2.0 mm diameter, Middle: Time dependence of pump power, Bottom: Temperature at $r = 0$.

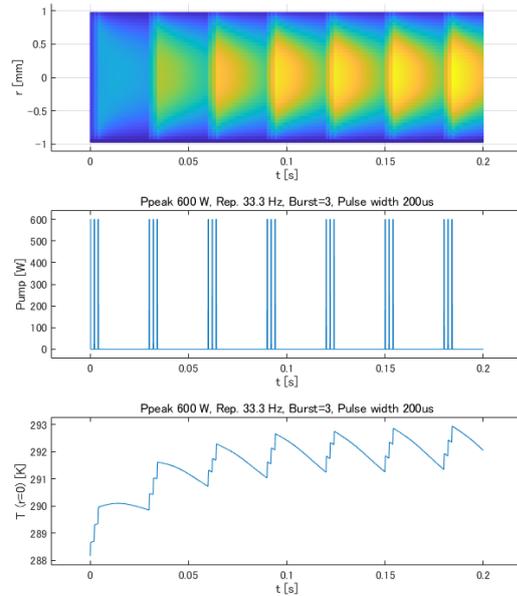


Fig.2 (b) Expanded view of Fig.2(a) over a time range of 0 to 0.2 seconds.

3. まとめ

我々は、小型・省電力化を目指した可搬型 3 波長 CO₂-DIAL を検討している。特に、エアロゾル変動が測定精度に与える影響を抑えることを目的に、2 ms 以下の波長切替速度を実現するバーストモード・トリプルパルス OPG 光源の開発に注力している。OPG 励起光の LD 励起 Nd:YAG レーザは、ロッド径を 7 mm とすることでバーストモード・トリプルパルス発振時でもロッド温度は 0.1°C 以下で安定することが、数値シミュレーションにより示された。これは、各パルス光の熱レンズ効果が同程度に保持されることを意味し、OPG 開発において有利に働く。今後、この結果を実験的に確認する予定である。

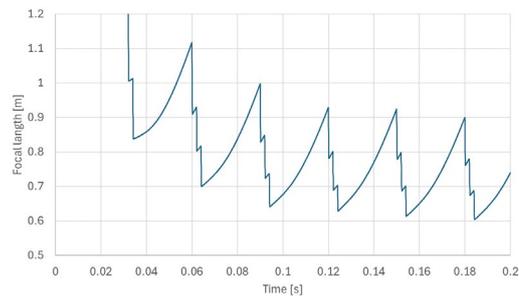


Fig.2(c) Change of focal length of thermal lens with time.

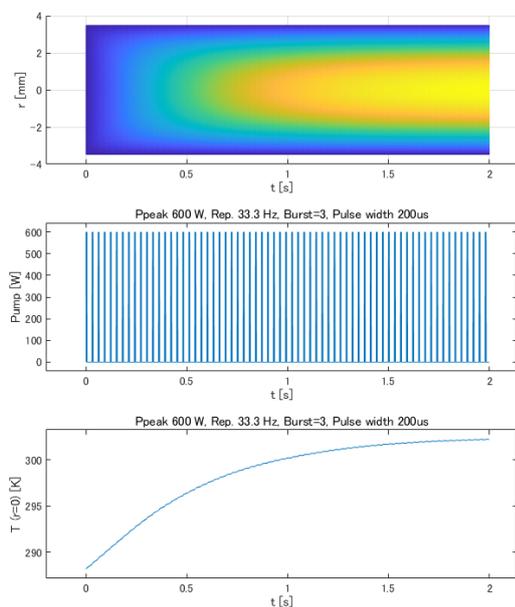


Fig.3 (a) Top: Temperature distribution in laser rod of 7.0 mm diameter, Middle: Time dependence of pump power, Bottom: Temperature at $r = 0$.

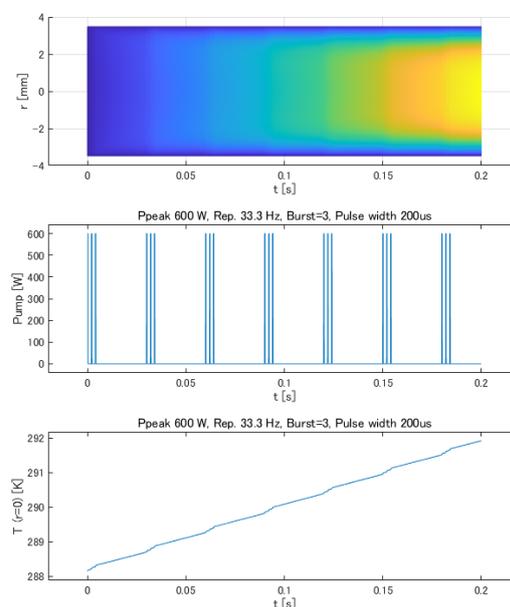


Fig.3 (b) Expanded view of Fig.3(a) over a time range of 0 to 0.2 seconds.

参考文献

- 1) Y. Shibata, C. Nagasawa, and M. Abo: Appl. Opt. **56**(4) (2017) 1194-1201.
- 2) Y. Shibata, C. Nagasawa, M. Abo, M. Inoue, I. Morino, and O. Uchino: Sensors, **18**(11) (2018) 4064.
- 3) 柴田泰邦、長澤親生、阿保真：第 41 回 レーザセンシングシンポジウム (2023), P-15.
- 4) Y.S. Huang, H.L. Tsai, F.L. Chang, Opt. Commun. **273** (2007) 515-525.