波長変換結晶の熱レンズを考慮した共振器設計による 高出力内部共振器型波長変換固体レーザーの安定化

小島 哲夫, 安井 公治

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 (〒 661-0001 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

Stabilization of High-Power Intracavity-Frequency-Doubled Solid-State Laser by Advanced Resonator Design in Consideration of Thermal Lensing of Nonlinear Crystal

Tetsuo KOJIMA and Koji YASUI

Advanced Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-0001

(Received December 12, 1997)

We have compensated for thermal lensing of nonlinear crystal and Nd:YAG rods by advanced resonator design in a high-power diode-side-pumped intracavity-frequency-doubled CW Nd:YAG laser. The maximum green output power of 27.0 W was generated with the beam quality of $M^2 = 7.9$. This value is, to our knowledge, the highest green output power in CW diode-pumped solid-state lasers. It was found that the green power fluctuation is caused by the unstable zone of the resonator due to the thermal lensing of the nonlinear crystal (KTP). TEM₀₀-mode green output power of 16.3 W was also generated.

Key Words: Diode-pumped solid-state laser, Intracavity frequency doubling, Thermal lensing, Nonlinear crystal, Stability zone

1. はじめに

高出力固体グリーンレーザーは、レーザー加工機用の光源¹⁾、医療用光源²⁾、チタンサファイアレーザー励起光源、およびレーザーディスプレイ用光源³⁾として期待されている。固体レーザーでは、高出力グリーン光は、ほとんどが非線形光学結晶を用いた波長変換により発生される。半導体レーザー(LD)励起Qスイッチ固体レーザーでは、ロッド型で106W⁴⁾、スラブ型で215W⁵⁾が報告されている。LD励起連続発振(CW)固体レーザーでは、側面励起で10W⁶⁾、端面励起で8.5W⁷⁾が報告されている。

内部共振器型波長変換固体レーザーにおいて縦モード結合によって生じる出力変動“グリーンプロブレム”がBearによって報告されて以来⁸⁾、内部共振器型波長変換固体レーザーの安定性解析が多くのグループによりなされてきた⁹⁻¹³⁾。低出力内部共振器型波長変換固体レーザーにおいては、グリーン出力の安定化は縦モード制御、あるいは偏光モード制御によりなされてきた⁸⁻¹³⁾。しかし、高出力内部共振器型波長変換固体レーザーの安定性の解析についての報告は少ない^{14,15)}。

本論文では、高効率なLD側面励起構成^{16,17)}と複レンズ補償共振器構成¹⁸⁾を用いた高出力内部共振器型波長変換LD側面励起固体レーザーの高出力動作について述べる。ま

た、波長変換結晶の熱レンズのグリーンレーザー安定性への影響の解析結果より、高出力内部共振器型波長変換固体レーザーの安定化を行った結果について述べる。さらに、波長変換結晶の熱レンズを考慮した共振器構成によって行ったTEM₀₀モードグリーン光発生についても述べる。

2. 高出力グリーン光発生

2.1 実験構成

高出力内部共振器型波長変換LD側面励起固体レーザーの構成をFig.1に示す。本構成においては、固体レーザーヘッドを2つ用いた¹⁷⁾。それぞれのレーザーヘッドには、8つの20W級LDアレイ、およびフローチューブと拡散反射集光器に囲まれたNd:YAGロッドが含まれる。このレーザーヘッドの均一励起分布と2つの固体レーザーヘッド間に配置された偏光ローテーターにより、複レンズ補償共振器構成となる¹⁸⁾。Z型の共振器には、2つの凹面エンドミラー、1つの平面折り返しミラー、および1つのハーモニクセパレーターを用いている。内部共振器型波長変換は、エンドミラーとハーモニクセパレーター間に配置したKTP(KTiOPO₄)結晶によりなされる。“グリーンプロブレム”を避けるために、 $\lambda/4$ 板をハーモニクセパレーターと固体レーザーヘッドの間に配置した。

Fig.1 Schematic drawing of the green laser system.

我々は、レーザー出力を熱吸収型パワーメーターにより測定し、ビーム品質をCOHERENT社のM²メーターで測定し、出力時間波形を積分球とPINフォトダイオードにより測定した。

2.2 実験結果

我々は、2種類の吸収率の異なるKTP結晶を用いて、グリーン光発生を行った。Fig.2に全LDアレイ出力に対するグリーン光出力を示す。長さ10mmの吸収率の低いKTP結晶(KTP-A)を用いた場合、全LDアレイ出力331.2W時に、グリーン出力27.0Wが得られた。この値は、我々の知るかぎり、LD励起CW固体グリーンレーザーにおける最高出力である。この時、ビーム品質は、 $M^2 = 7.9$ であり、光効率は8.2%、電気-光効率は2.8%であった。また、同構成でKTP結晶を除いて透過率8.0%の出力ミラーを用いた場合に、全LDアレイ出力331.2W時に基本波出力92Wが得られたことより、基本波からグリーン光への変換効率は29.3%となる。一方、長さ15mmの吸収率の高いKTP結晶(KTP-B)を用いた場合は、全LDアレイ出力331.2W時のグリーン出力は25.5Wであり、ビーム品質は $M^2 = 11.2$ であった。

全LDアレイ出力331.2W時のグリーン出力時間波形をFig.3に示す。KTP-Aの場合は周波数数十kHzオーダーのパルス状の出力変動は見られないが、KTP-Bの場合は周波数数十kHzオーダーのパルス状の出力変動が発生している。変動周波数に対する出力変動の大きさをFig.4に示す。こ

Fig.2 Green output power as a function of the total diode output power.

Fig.3 Time traces of the green output power at the total diode output power of 331.2 W by use of (a) 10-mm KTP-A and (b) 15-mm KTP-B. Horizontal axis shows 20 μ s/div.

Fig.4 Power fluctuation versus the frequency defined as the inverse of the time scale of the time trace.

こでは、変動周波数は、出力時間波形の時間スケールの逆数と定義している。Fig.4には、全LDアレイ出力331.2W時の基本波出力変動の大きさ、基本波出力変動の大きさから見積もったグリーン出力変動の大きさ、およびKTP-Bを用いた場合の全LDアレイ出力201.5W時のグリーン出力変動の大きさを共に示している。KTP-Aの場合、50Hz以上の周波数では、グリーン出力変動の大きさは基本波から見積もったグリーン出力変動の大きさに近い値となっている。しかし、KTP-Bの場合の50Hz以上の周波数のグリーン出力変動の大きさは、全LDアレイ出力201.5W時には、基本波から見積もったグリーン出力変動の大きさとほぼ等しいが、全LDアレイ出力331.2W時には、基本波から見積もったグリーン出力変動の大きさの1.5倍程度大きくなっている。時間スケール2s/div.のグリーン出力時間波形から、50Hz以下の周波数のグリーン出力変動は、高周波の出力変動により、基本波から見積もったグリーン出力変動より大

きくなったと考える。

3. 安定性解析

我々は、KTP結晶の違いおよびレーザーの動作点の違いによるグリーン出力変動の大きさの違いの原因を調べるため、KTP結晶の基本波吸収ロスを測定した¹⁹⁾。長さ15mmのKTP-Bの吸収ロスが長さ10mmのKTP-Aの吸収ロスより10倍大きいことがわかった。

この吸収ロスの違いだけでは、レーザーの動作点の違いによるグリーン出力変動の大きさの違いを説明できないので、レーザービームの吸収によるKTP結晶の熱レンズを共振器安定動作範囲の計算に導入した。KTP結晶のグリーン吸収パワーは基本波吸収パワーの1/10程度のため¹⁹⁾、KTP結晶の熱レンズは基本波の吸収によってのみ生じるものとして、全LDアレイ出力331.2W時のKTP結晶の熱レンズ焦点距離を、KTP-Aの場合は約1650mm、KTP-Bの場合は約200mmと見積もった²⁰⁾。共振器安定動作範囲の計算は、光線行列を用いて行った²¹⁾。

全LDアレイ出力に対するグリーン出力およびロッド端における共振器ガウスビーム径により表した共振器安定動作範囲をFig.5に示す。KTP-Aの場合の全LDアレイ出力331.2WおよびKTP-Bの場合の全LDアレイ出力201.5Wは安定動作領域の中に入っているが、KTP-Bの場合の全LDアレイ出力331.2Wは不安定動作領域に近づいている。これより、我々は、KTP結晶の違いおよびレーザーの動作点の違いによるグリーン出力変動の大きさの違いと共振器安定動作領域には関係があると考えた。

4. グリーン出力安定化

グリーン出力変動の大きさと共振器安定動作領域とに関係があることを確かめるため、KTP結晶の熱レンズを考慮して、長さ15mmのKTP-Bに対する共振器を再設計した。再設計した共振器(改善型共振器)では、共振器長を変化させることにより、全LDアレイ出力331.2Wの動作点を安定

Fig.5 Green output power and calculated stability zone as a function of the total diode output power.

Fig.6 Green output power and the calculated stability zone as a function of the total diode output power in the case of the improved resonator with the 15-mm KTP-B.

Fig.7 Time traces of the green output power at the total diode output power of 331.2 W in the case of the improved resonator with 15-mm KTP-B. Horizontal axis shows 20 ms/div.

動作領域内に入るようにしている。長さ15mmのKTP-Bを用いた改善型共振器における全LDアレイ出力に対するグリーン出力および共振器安定動作範囲をFig.6に示す。全LDアレイ出力331.2Wが安定動作領域内に入っていること

Fig.8 Green power fluctuation versus the frequency defined as the inverse of the time scale of the time trace in the case of the improved resonator with the 15-mm KTP-B at the total diode output power of 331.2 W.

がわかる。全LDアレイ出力331.2W時のグリーン出力時間波形を示すFig.7より、共振器安定動作領域内でレーザーを動作させることにより、パルス状の出力変動は発生しないことがわかる。出力時間波形の時間スケールの逆数と定義した変動周波数に対する全LDアレイ出力331.2W時のグリーン出力変動の大きさをFig.8に示す。ここでは、長さ15mmのKTP-Bを用いた改善前の共振器における出力変動の大きさおよび基本波出力変動の大きさから見積もったグリーン出力変動の大きさを共に示している。50Hz以上の周波数においては、改善型共振器におけるグリーン出力変動の大きさは、改善前の共振器におけるグリーン出力変動の大きさより小さくなり、基本波から見積もったグリーン出力変動の大きさとほぼ等しくなっている。吸収率の大きいKTP-Bを用いても、共振器安定動作領域内でレーザーを動作させることにより、グリーン出力を安定化できることがわかった。したがって、我々は、大きなグリーンパワー出力変動はKTP結晶の熱レンズによって生じる共振器不安定動作領域によって引き起こされると考える。

また、我々は、高吸収率のKTP-Bの温度分布が低吸収率のKTP-Aの温度分布より大きい場合、KTP-Bの変換効率が下がり、長さ15mmのKTP-Bを用いた場合のグリーン出力が長さ10mmのKTP-Aを用いた場合のグリーン出力とほぼ等しくなったと推測する。

5. TEM₀₀ モードグリーン光発生

KTP結晶の熱レンズを考慮した共振器設計方法により、TEM₀₀モード動作可能な共振器を設計した。TEM₀₀モード動作のため、凹面エンドミラーを凸面エンドミラーに変更し、共振器長を延長することにより、ロッド端面における共振器ガウスビーム径を拡大した。長さ10mmのKTP-Aを用いた場合の全LDアレイ出力に対するグリーン出力、ビーム品質M²、および共振器安定動作範囲をFig.9に示す。全LDアレイ出力315.0W時にTEM₀₀モードグリーン出力16.3Wを得た。ビーム品質は、M²=1.2であった。光効率は

Fig.9 Green output power, beam quality, and the calculated stability zone as a function of the total diode output power in the case of the TEM₀₀-mode resonator with the 10-mm KTP-A.

Fig.10 TEM₀₀-mode green power fluctuation versus the frequency defined as the inverse of the time scale of the time trace.

5.2%であり、電気-光効率は1.7%であった。出力時間波形の時間スケールの逆数と定義した変動周波数に対するTEM₀₀モードグリーン出力変動の大きさ、TEM₀₀モード基本波出力変動の大きさ、およびビーム品質M²=7.9時のグリーン出力変動の大きさをFig.10に示す。周波数50Hz以下においては、TEM₀₀モードグリーン光はビーム品質M²=7.9時のグリーン光と同程度に安定化できた。周波数50kHzにおけるTEM₀₀モードグリーン出力変動の大きさはビーム品質M²=7.9時のグリーン出力変動の大きさより大きくなっているが、これはTEM₀₀モード時の基本波出力変動が大きくなったことによる。TEM₀₀モード時の基本波出力変動が大きくなったのは、不安定動作領域に近い動作点で動作していることが原因であり、安定動作領域の中央付近でTEM₀₀モード動作できるように共振器を変更すれば、さらに安定なTEM₀₀モードグリーン出力が得られると考える。

6. まとめ

我々は、内部共振器型波長変換LD側面励起CW Nd:YAGレーザーの高出力動作を行い、波長変換結晶の熱レンズのグリーンレーザー安定性への影響の解析結果より、高出力内部共振器型波長変換固体レーザーの安定化を行った。さらに、波長変換結晶の熱レンズを考慮した共振器構成によってTEM₀₀モードグリーン光発生も行った。

高出力動作においては、27.0WのCWグリーン光出力をビーム品質M²=7.9で得た。この値は、我々の知るかぎり、LD励起CW固体グリーンレーザーにおける最高出力である。

高出力内部共振器型波長変換固体レーザーの安定性解析においては、KTP結晶の熱レンズによって生じる共振器不安定動作領域にレーザーの動作点が近づくことがグリーンレーザーの大出力変動の原因であることがわかった。KTP結晶の熱レンズを考慮して共振器を設計し、共振器安定動作領域内で動作させることにより、グリーンレーザーの安定化を行った。高出力内部共振器型波長変換固

体レーザーにおいては、波長変換結晶の熱レンズを考慮して共振器を設計する必要がある。

TEM₀₀モード動作においては、KTP結晶の熱レンズを考慮した共振器を用いることにより、16.3WのCWグリーン光出力をビーム品質 $M^2 = 1.2$ で得た。今後、さらなる高出力化・高安定化を目指したい。

謝 辞

本研究を理解し、御支援をいただいた吉沢 憲治氏、田中正明氏、八木 重典氏、並びに本研究に対する御協力、有益な議論をいただいた藤川 周一氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) J. Golden: LASER FOCUS WORLD (1992, June) p.75.
- 2) M. V. Ortiz, J. H. Fair, and D. J. Kuizenga: *OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers*, 1992 (Optical Society of America, Washington, D. C., 1992) p.361.
- 3) W. E. Glenn: *OSA Trends in Optics, and Photonics Vol. 10, Advanced Solid State Lasers*, 1997 (Optical Society of America, Washington, D. C., 1997) p.38.
- 4) B. J. Le Garrec, G. J. Razé, P. Y. Thro, and M. Gilbert: *Proc. LEOS '96 9th annual meeting, vol. 2* (IEEE, Piscataway, 1996) p.222.
- 5) W. T. Lotshaw, M. J. Kukla, A. L. Oritiz Jr., P. R. Staver, J. R. Unternahrer, R. Burnham, and G. Moule: *Postdeadline Papers of Conf. Lasers and Electro-Optics '97* (Optical Society of America, Washington, D. C., 1997) paper CPD33.
- 6) D. Golla, S. Knoke, W. Schöne, M. Bode, A. Tünnermann, and H. Welling: *Nonlinear Frequency Generation and Conversion, Proc. SPIE vol. 2700* (1996) p.314.
- 7) M. D. Selker, T. J. Johnston, G. Frangineas, J. L. Nightingale, and D. K. Negus: *Postdeadline Papers of Conf. Lasers and Electro-Optics '96* (Optical Society of America, Washington, D. C., 1996) paper CPD21.
- 8) T. Baer: *J. Opt. Soc. Am. B* **3** (1986) 1175.
- 9) D. W. Anthon, D. L. Sipes, T. J. Pier, and M. R. Ressler: *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-28** (1992) 1148.
- 10) M. Oka and S. Kubota: *Opt. Lett.* **13** (1988) 805.
- 11) G. E. James, E. M. Harrel II, C. Brackowski, K. Wiesenfeld, and R. Roy: *Opt. Lett.* **15** (1990) 1141.
- 12) X-G Wu and P. Mandel: *J. Opt. Soc. Am. B* **4** (1987) 1870.
- 13) H. Nagai, M. Kume, I. Ohta, H. Shimizu, and M. Kazumura: *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-28** (1992) 1164.
- 14) V. Magni, G. Cerullo, S. De Silvestri, O. Svelto, L. J. Qian, and M. Danailov: *Opt. Lett.* **18** (1993) pp.2111.
- 15) W. L. Nighan, Jr. and J. Cole: *Postdeadline Papers of Advanced Solid State Lasers*, 1996 (Optical Society of America, Washington, D. C., 1996) paper PD4.
- 16) T. Kojima and K. Yasui: *Post Deadline Papers of CLEO/Pacific Rim, 1995* (IEEE, Piscataway, 1995) paper PD2.2.
- 17) S. Fujikawa, T. Kojima, and K. Yasui: *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* **3** (1997) p.40.
- 18) K. Yasui: *Appl. Opt.* **35** (1996) p.2566.
- 19) T. Kojima and K. Yasui: *OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers, vol. 24* (Optical Society of America, Washington, D. C., 1995) p.80.
- 20) W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering, 4th ed.* (Springer-Verlag, Berlin, 1995) p.400.
- 21) A. E. Siegman: *Lasers* (University Science Books, Mill Valley, 1986) p.581.