熱光学歪み解消共振器による高輝度固体レーザーの低雑音化 および出力安定化

安井 公治, 今野 進, 小島 哲夫, 藤川 周一

三菱電機(株) 先端技術総合研究所 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)

Stable Operation of High-Brightness Solid-State Lasers by Using Thermal-Distortion-Compensated Resonators

Koji YASUI, Susumu KONNO, Tetsuo KOJIMA, and Schuichi FUJIKAWA

Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661

(Received March 29, 1999)

Output stability and noise-reduction for high-brightness solid-state lasers have been discussed. Unstable operations of rod-geometry solid-state lasers are analyzed by using wave-optics calculations considering polarization-dependent bifocusing of solid-state rods. It is shown that multiple-stability zones of resonators lead to unstable and noisy operation and bifocusing compensation could ensure stable and low-noise operations.

Key Words: Beam quality, Material processing, Bifocusing, Solid-state laser, Brightness

1. はじめに

ここで対象とするレーザー出力が100Wを超えるような高出力で高ビーム品質の発生が可能な高輝度固体レーザーは、市場規模としては、加工用途が多い。主として、金属の切断、溶接などの板金加工に用いられるものであるが、理論限界のビーム品質の発生や、高出力波長変換による、高輝度の可視、紫外レーザーの発生により、環境計測や通信用途などの科学用途への応用展開も模索されている。

加工用高輝度レーザーは、産業用ツールとして、5-10年を超えるTCO (Total Cost of Ownership) : 総コストが最低となることを主眼に開発されており、これを基軸に加工以外のレーザーシステムを構築することができれば、経済的で、社会的な意義も高いレーザーシステムが開発できると考える。

もっとも加工用途と、それ以外では、レーザーに求められる安定性の質の違い、すなわち、同じ低雑音化、出力安定化といっても定義の違いが懸念される。そこで、本稿では、はじめに、この研究の背景を述べ、研究の必要性和対象とする雑音、安定性の定義を行なう。次に、従来の高輝度固体レーザーの抱えている問題点を概観し、その解決事例を紹介する。

レーザー出力の低雑音化、出力安定化というと、制御技術が話題の中心になることが多い。しかしながら、この解説で話題とする100W以上の高出力レーザーの低雑音化、安

定化を制御技術のみで行なうことは、信頼性という観点で新たな課題を提起する。特にコスト意識の厳しい加工業界での使用を考えると、なるべく制御装置が少なくても安定なレーザーの実現が望ましいと考えられる。

2. 研究の背景

加工用高出力レーザーに要求される安定性は、通常の応答時間0.1秒程度の蓄熱型パワーメーターで観測される安定性で十分であるが、さらに安定性を要求される場合にも、0.1ms (= 10kHz) 程度までのレベルである。固体レーザー媒質の緩和時間、ならびに、共振器の音響光学効果によるカオス的な出力変動を考慮しても¹⁾、10kHzまでの出力変動を安定化すれば十分であると考ええる。

実際の固体レーザー装置においては、10kHz程度までの出力変動はピンフォトダイオードなどの安価な検出素子で容易に観測できる。最近の工業用固体レーザーにおいては、この周波数レベルにおいては、安定性は高い。しかしながら、ビーム品質を向上させた場合に、雑音が発生する。この報告については、各社の秘密事項にもあたり、残念ながら口頭説明以上の詳細データの公開は、ほとんどされていない。あるレベル以上にビーム輝度を上げると、急激に安定性が悪くなり、共振器ミラーに触れただけでパワーが数十%変動する状況となることが共通認識とされている。

しかしながら、その理論背景は、十分に説明されていない

い。そこで、本稿では、筆者らの進めた高輝度安定化、しかも産業用途のNd:YAG固体レーザーの熱歪み解消共振器による安定化に的を絞って解説する。

3. ロッド型固体レーザーの高輝度化に伴い発生する雑音の原因

産業用途で一般的なロッド型固体レーザーを例題にとり、高輝度化にともなう雑音発生原因を説明する。ある程度以上の高ビーム品質化を狙うと、出力が急激に不安定になることである。この解決法に触れる前に、ビームの高品質化と高輝度化の関係を述べる。

ビーム輝度は、以下のように定義される²⁾。

$$B = \frac{P}{(\lambda \cdot M^2)^2} \quad (1)$$

ここで、 B はビーム輝度、 P はレーザーパワー、 λ は波長、 M^2 はビーム品質指標である。ビーム品質 M^2 は、ガウスビーム半径と概ね以下の式で結ばれる³⁾。

$$M^2 \propto \left(\frac{\phi}{2\omega} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 ϕ はロッド直径、 ω はロッド内での最大ガウスビーム半径である。従って、同じアパーチャ径(通常ロッド径)のもとで、輝度を上げるには、ガウスビーム半径の増大による M^2 値の低減が効果的である。これは、例えば共振器長の増大により実現できる。

励起強度一定で、共振器長を増大させて高輝度化した場合、ある時点で急激にパワーが変動するようになる。これをFig.1で説明する。

Fig.1には、長さ100mmのNd:YAGロッドの両端から200mmの距離の点に平面ミラーを配置した安定型共振器内の最大基本モードビーム半径の計算例を示す。ここでは、直径4mmのNd:YAGロッドを、波長808nmのレーザーダイオードで励起した場合を例に示した。

Fig.1 Beam waist size as a function of the pumping power. The solid line represents beam waist size for r -polarization mode in Fig.2 (a) and the broken line for ϕ -polarization mode in Fig.2 (b).

Fig.2 Polarization state expressions of two eigen modes in the resonator.

ここで、ビーム半径は、Fig.2 (a)に示す偏光成分に対するもの(r 偏光)と、Fig.2 (b)に示す偏光成分(ϕ 成分)に対して別々に計算、それぞれに対する計算値を、実線、点線で示してある。

高入力点、例えばFig.1のA点(入力340W)では、Fig.2 (b)の回転偏光成分モードのみが発振できる。この偏光成分は、ロッドの軸対称性の変動に敏感である。例えば、冷却水の流の変動でロッドが振動したり、共振器ミラーの変動、励起分布の変動により、回転偏光成分の一部が容易にFig.2 (a)の r 偏光成分に変換される。発振点A近くでは、 r 偏光成分は不安定領域にあり、共振器外部に放出される。

Fig.3に、340Wポンプ入力時の共振器内に発生するビームの伝播状況を示す。平面ミラー前面からの距離として、共振器内の1往復分のビーム伝播状況を示している。点線で示す ϕ 偏光成分の伝播特性を見ると、いわゆる安定型共振器動作をしており、往復で同じ経路を伝播する形状、すなわち同じ伝播パターンが2回繰り返している。しかしながら、 r 偏光成分に対しては、不安定型共振器の経路で光が伝播している。この不安定型共振器の経路は、いろいろな経路が考えられるが、ここではロッドの中央部を始点とする経路を示している。この経路では、1回の往復での損失は90%以上にもなり、特殊な高ゲインパルス発振状況を除いて発振することができない。従って、 ϕ 偏光で発振したビー

Fig.3 Beam propagation for resonant modes. The solid line represents the beam propagation for r -polarization and the broken line represents for ϕ -polarization mode for the pumping power of 340 W in Fig.1 as a function of distance from one resonator mirror.

ムが、システムの軸対象からのずれにより、その一部が偏光になると、直ちに不安定型共振器経路に沿って、共振器外部に損失として放出される。このため、固体素子の振動等の外部環境変化で出力が大きく変動すると定性的に説明できる。

固体素子、ミラーの振動周波数はkHzレベルであるから、このレベルの振動が観測される。さらに、光学部品的位置変動に敏感であり、実際、例えば、共振器ミラーに触れただけでもパワーは大きく変動する。いままでの経験を裏付ける結果が観測されると定性的に説明できる。振動に対する変動の計算手法は既に示されており⁴⁾、偏光を考慮した2次元波動計算シミュレーションを用いれば、さらに定量的な雑音発生把握ができるが別途報告する。

4. 熱光学歪み解消共振器による安定化

前章の問題は、均一励起した2つのロッドと90度偏光回転ローテーターを用いて、2つの偏光方向に対して熱レンズを平均化する方法(社内呼称HIPER構成)で解決できる。2つの無収差ロッドと90度偏光回転ローテーターを用いると言い換えても良い^{5,6)}。

2つのロッドと偏光回転ローテーターを用いる方法(2ロッド構成)は、プリュースター板を挿入した直線偏光レーザーの複屈折解消のために、1971年に提唱されている⁷⁾。しかしながら、ランダム偏光で、しかもマルチモード発振の場合には効果がないとされてきた。

マルチモード発振においても、通常の産業用レーザーのように $M^2=100$ 以上の低輝度状態では効果は少ない。しかし、 M^2 値で100以下にする高輝度状態では、ランダム偏光発振においても効果を発揮する。これは、前章で説明したように、 r 偏光と ϕ 偏光で異なるポイントで動作するようになり、共振器自体が、 $r\phi$ 座標での基本偏光である2つの回転偏光の一つを選択する作用を持つ。すなわち、 $r\phi$ 座標での直線偏光規定素子を挿入したものに相当する状態となるためである。

しかし、2ロッドと偏光回転ローテーターを用いる構成を共振器へ適用して安定な高輝度出力を得たという報告は、マルチモード、基本モード発振を問わず、最近になるまでなかった。これは、高輝度化のころみが、中央部の強い励起によるゲインアパーチャにより行なわれてきたためと考える。

高輝度ビームを得るために、ロッド中央部を強く励起する、いわゆるゲインアパーチャによるビームモード選択方式が効率的なのは、熱レンズの効果の小さい低出力レーザーの場合のみであり⁸⁾、熱レンズ効果の大きな高出力レーザーでは、むしろ均一励起したハードアパーチャによるビームモード選択方式が効率が良くなる⁸⁾。高出力動作での安定高輝度発振のために、均一励起が重要であることは別報に詳細があるが⁹⁾、以下でも簡単に説明する。

均一励起を施さない場合でも、例えば直線偏光の増幅器としては2ロッド構成は有効であり^{4,10)}、さらに、偏光保存効果を高めるために、その光学的な伝播に対し像転写構成を取る必要性も検討されてきている¹⁰⁾。いずれも、入力

直線偏光であり、かつ共振器を用いていないために効果を発揮している。このように、偏光状態の保持のみであれば、均一励起は必要としない。同じ励起分布のものを2つならべ、転写光学系により同じ光路を通過させれば偏光状態は保持できる^{4,10)}。しかし、共振器への適用では、以下のように動作は異なる。

Fig.4に、均一励起せず、しかも2ロッド構成を用いない場合で、Fig.1の計算で用いた共振器の平面ミラーを凸型に変更し、発振ポイントを、高入力側に移動させた共振器を用いた場合の安定領域と、その各点での発振モード、偏光状態を模式的に示す。中央部と周囲部に熱レンズ効果の差がある場合に、励起の増大に対応して、発振領域、固有偏光モードが変化する様子を示す。図中斜線部が発振可能領域であり、偏光モードが記載されていないものは、ランダム偏光が発振可能であることを示す。このように、共振器内にアパーチャや、偏光子を挿入しなくても、共振器が、発振部位と発振可能な固有偏光モードを規定する。この場合には、すでに説明したように、ロッドの微小振動によって、レーザーパワーが大きく変動し、出力の不安定さ、雑音が発生する。均一励起した2つのロッドを90度偏光回転ローテーターを用いることにより、全発振領域内で、固体素子断面内全部でランダム偏光の発振が保証できる。

ここでの高輝度化に有効な2ロッド方式と、いわゆる2つのロッドを用いた直線偏光レーザー光に対する複屈折補償との違いをTable 1にまとめる。均一励起により偏光依存複屈折を解消することがポイントである。

均一励起していない2つのロッドを共振器内に入れた場合の波面の崩れを、波面補償板により補償する方法も考えられ、TEM₀₀モード60Wの発生が実現している¹¹⁾。しかし、安定動作は、特定の入力点のみであり、実用化には至っていない。均一励起によるロッド内の複屈折解消により、高輝度化による雑音の増加、出力の不安定化を招くことなく、500Wレベル以上での動作が初めて実証された⁵⁾。複屈折解消構成を施した場合には、Fig.5 (a)に示すように

Fig.4 Beam waist size and the polarization state as a function of the pumping power for high-brightness operations of a rod-geometry Nd:YAG laser. The hatched space represents operated area. The lines represent (1) r -polarization mode at the central space of the rod, (2) r -polarization mode at the peripheral space of the rod, (3) ϕ -polarization mode of the central space of the rod, and (4) ϕ -polarization mode of the peripheral space of the rod, respectively.

Table 1 Evaluation of effectiveness of (1) 2-rod configuration, (2) uniform-pumping, and (3) 2-rod configuration & uniform-pumping on output stability of optical resonators depending on four operating conditions.

	Low-brightness operation (random-polarization)	Low-brightness operation (linear-polarization)	High-brightness operation (random-polarization)	High-brightness operation (linear-polarization)
(1) 2-rod configuration	$\triangle$: low	$\odot$: high	$\triangle$: low	$\circ$: medium
(2) Uniform-pumping	$\triangle$: low	$\triangle$: low	$\circ$: medium	$\triangle$: low
(3) 2-rod configuration & uniform-pumping(HIPER)	$\triangle$: low	$\odot$: high	$\odot$: high	$\odot$: high

Fig.5 Stable operation by using bifocusing-compensated resonator at laser power of 500 W: (a) with bifocusing compensation and (b) without bifocusing compensation.

レーザー出力は安定するが、熱複レンズ解消構成を施さない場合には、Fig.5 (b)に示すように出力は不安定となる。

また、科学応用領域で必要なCWでのTEM₀₀発振も実現されており、連続発振モードで100W以上の出力を実現している¹²⁾。この均一励起構成でのTEM₀₀化は、ハードアパーチャによるビーム選択であり、回折損失の影響を受ける⁸⁾。従って、その高効率化のためには、高い透過率を用いることができる高出力、もしくは、高ゲインパルス動作が有利となる。例えば、パルス動作では、200Wを超えるTEM₀₀出力の発生も実現している¹³⁾。

5. おわりに

熱光学歪み補償により、加工レベルでの使用には十分なレベルの低雑音化、出力安定化を実現した高輝度固体レーザーについて解説した。この特集号の他の解説とかなり趣が異なるが、一方で、もっとも市場が大きな分

野であることも重要である。この分野でのコストアップは、レーザーシステム全体のコストアップにつながる。

この加工用固体レーザーを基軸にした科学用レーザー実現のためには、より低雑音化へ向けての制御が必要と考えるが、現状で市販工業用固体レーザーと同等の安定性が実現しており、この安定性を元にすれば、従来の制御器の付加で科学用途に必要な安定性が得られるレベルに至っていると考える。例えば、超短パルスレーザーの励起光源を目的として、安定なグリーンレーザーを実現している¹⁴⁾。さらに、このグリーンを用いた安定な紫外光発生も開始した¹⁵⁾。加工レーザーを機軸に、広い範囲の需要にこたえていきたいと考える。

参考文献

- 1) V. V. Kikhanskii and A. P. Napartovich: Sov. J. Quantum Electron. **27** (1981) 96.
- 2) 安井 公治, 小島 哲夫, 藤川 周一, 竹中 裕司, 西前 順一: レーザー研究 **26** (1998) 730.
- 3) A. E. Siegman: *Lasers*, University Science Books (1986).
- 4) N. Kugler, S. Dong, Q. Lu, and H. Weber: Appl. Opt. **36** (1997) 9359.
- 5) K. Yasui: Appl. Opt. **35** (1996) 2566.
- 6) S. Konno, S. Fujikawa, and K. Yasui: Appl. Phys. Lett. **70** (1997) 2650.
- 7) W. C. Scott and M. de Witt: Appl. Phys. Lett. **18** (1971) 3.
- 8) K. Yasui, S. Konno, S. Fujikawa, and K. Yoshizawa: Lase '99, San Jose, January (1999) 3611.
- 9) 安井 公治: レーザーセミナー'96, レーザー学会 (1996).
- 10) J. R. Park, J. Y. Lee, H. S. Kim, K. Y. Um, and H. J. Kong: Opt. Rev. **4** (1997) 170.
- 11) S. C. Tidwell, J. F. Seamans, and M. S. Bowers: Opt. Lett. **18** (1993) 116.
- 12) S. Fujikawa, S. Konno, K. Yasui, and K. Yoshizawa: OSA Advanced Solid-State Lasers 14th Tropical meeting, Boston, 1999.
- 13) Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto, and K. Kasahara: Conference on Lasers and Electro-Optics '98, CPD1, San Francisco, 1998.
- 14) 今野 進, 藤川 周一, 小島 哲夫, 安井 公治: レーザー学会第19回年次大会予稿集 (1999年1月) 28aI19.
- 15) 小島 哲夫, 今野 進, 藤川 周一, 安井 公治, 吉澤 憲治, 森 勇介, 佐々木 孝友, 田中 光弘, 岡田 幸勝: レーザー学会第19回年次大会予稿集 (1999年1月) 28aI8.

レーザーワード

熱光学歪み解消共振器

(thermal-distortion-compensated resonators)

共振器を構成する光学部品の熱変形によるレーザー発振動作変動を解消する機構を備えたレーザー共振器。例えばNd:YAGレーザーを代表とする固体レーザーを例にとると、共振器内に配置された固体素子が、光励起により熱変形すると、通過するレーザービームに対して、レンズとして作用するようになり、また、そのレンズ化の度合いは、

通過するレーザービームの偏光方向により異なるようになる。このために、共振器の動作点にずれが発生し、極端な場合には発振が停止する。このレンズ作用を打ち消したり、偏光方向によるレンズ作用を打ち消すために、複数の固体素子と偏光回転素子を用いたり、共振器内にレンズ素子を配置したものを熱光学歪み解消共振器と呼ぶ。

(安井 公治)