複合共振器型Tm, Ho:YLFレーザーの単一縦モード発振動作特性

伊澤 淳^{*,†}, 中島 勇人^{*}, 原 熙^{*}, 有本 好徳^{**}

^{*}石川島播磨重工業(株) 航空宇宙事業本部技術開発事業部光プロジェクト部
(〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1)

^{**}通信総合研究所 宇宙通信部宇宙技術研究室 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

Lasing Performance of a Double-Cavity Tm, Ho:YLF Laser in Single-Longitudinal-Mode Oscillation

Jun IZAWA,^{*,†} Hayato NAKAJIMA,^{*} Hiroshi HARA,^{*} and Yoshinori ARIMOTO^{**}

^{*}The Laser Engineering Department, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

1 Shin-nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama, Kanagawa 235-8501

^{**}Technology Section, Space Communications Division, Communications Research Laboratory

4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

(Received May 10, 2000)

We studied the lasing performance of a Tm, Ho:YLF laser using single- and double-cavity configurations. The double-cavity configuration provided 30 mW in single-mode oscillation, which exceeded that with the single-cavity configuration. Furthermore, we obtained a tunable range of 15 GHz when using the double-cavity configuration at room temperature. In addition, we compared the lasing performance of single-mode oscillation using internal mirrors with differing reflectivities.

Key Words: Tm, Ho:YLF laser, Eye-safe laser, Laser-diode pump laser, Single mode oscillation, Tunable laser

1. 序 言

近年環境問題に対する関心の増加に伴い、環境計測にレーザーを用いる動きが強まってきた。レーザーの使用環境は、屋外屋内を含めて人が存在する場所である可能性が高くなり、使用レーザーによる人体への影響がないことが必須の条件になる。このようなレーザーとして期待されるものは通常アイセーフ・レーザーと呼ばれており、目に対する障害しきい値の大きなレーザーで、発振波長1.4 μm 以上のレーザーである。以下で述べるTmドープレーザー(以下Tmレーザー)及びTm, Hoコードープレーザー(以下Hoレーザー)の発振波長は、前者が1.91~2.16 μm 、後者が~2.1 μm のアイセーフ領域で波長可変であり、しかも高効率期待され、パルス発振でもcw発振でも可能である。前者は、1962年にL. F. Jhonsonらのグループによって最初の発振成功が報告された¹⁾。後者は、L. F. Jhonsonらによって1964年に報告された²⁾。その後、Tm:YAGレーザーについて、スロープ効率が56%に達する結果がNRLの

Esterowitzらによって1990年に報告され³⁾、高効率⁴⁾が実証された。現在ではレーザーダイオード(LD)を励起光源とした高効率、小型のTmおよびHoレーザーの研究が行われている⁴⁾。Tmレーザーは励起過程で、緩和励起という励起法を取るため量子効率が2となり、理論的最大スロープ効率は70%以上にも達する。Hoレーザーは励起されたTmイオンからエネルギー移乗過程を経て、励起される方式が現在最も多く用いられているが、1.9 μm の赤外光で直接励起する方法により、量子効率が90%に達したという報告もMITのグループによって1995年に発表されている⁵⁾。

2 μm 帯の波長域は、大気の透過特性の良い領域で、且つ太陽光や雲からの背景放射の少ないところであるため、高いS/N比で計測が可能になる。また、これらのレーザーは医療分野への応用やリモートセンシング装置への応用が期待されている。特に、風向風速測定のためのコヒーレントレーザーレーダへの応用は、気象予報や航空機の安全運行に大きく寄与すると期待されている。

我々はこのように様々な優れた特性を持つ高効率なTm

[†]現在の所属：石川島播磨重工業(株) 技術開発本部メカトロ総合開発センター電子機器開発部電子システム応用グループ
(〒135-8732 東京都江東区豊洲3-1-15)

[†] Present address: Electronics System Group, Electronic System Development Department, Mechatronics Development Center, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 3-1-15 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8732

およびTm, Hoレーザーをコヒーレントレーザーレーダのシード光源に応用することを目的として、小型で高出力かつ高安定な単一縦横モード発振が可能なレーザー光源の開発を行っている。本論文では、Tm, Ho:YLFレーザーについて、LD励起マイクロチップ共振器における単一縦モード発振の高安定、高出力化とチューナビリティの容易さを目的として3ミラーにより構成される複合共振器を採用し、その単一波長発振特性における有用性を明らかにする実験を行った。

母材結晶にYLF結晶を用いたのは、直線偏光発振の容易さからである。発振波長 $2.063\mu\text{m}$ で最大出力 30mW の単一縦横モード発振を得た。また、複合共振器の内部反射鏡の反射率の違いによる単一波長発振特性の比較を行った。これらの実験から、複合共振器型Tm, Ho:YLFレーザー高安定、高出力の単一波長レーザー光源として優れた特性を持つことが明らかとなったので、その詳細を報告する。

2. 高出力単一縦モード発振へのアプローチ

単一波長発振の手法の一つに、共振器長を極端に短くすることにより発振モードを制限するマイクロチップ共振器方式があり、研究当初はNd:YAGレーザーで研究が行われており、単一縦モード発振に成功している⁶⁾。しかし、TmおよびHoイオンを発振媒質とする固体レーザーのゲイン幅は、Nd:YAGレーザーのゲイン幅に比較して格段に広い(ちなみにNd:YAGレーザーのゲイン幅⁶⁾は常温で約 2nm に対してHoレーザーのゲイン幅は約 20nm 以上の広さを持つ⁷⁾)。このため、単一縦モードを実現するために、共振器間隔を狭くして縦モード間隔を広げようとする、Nd:YAGレーザーは共振器長を 1mm 程度にするだけでゲイン幅の中の縦モードを1本にすることが可能となるのに対して、Tm、及びHoレーザーでは共振器間隔を 0.1mm 程度まで低下させなければならないため、発振が困難となる。そこで我々はこのマイクロチップレーザーに内部反射鏡を加えた3ミラー構成による複合共振器を採用した⁸⁾。通常のマイクロチップレーザーが結晶の両端面で共振器を構成しているのに対して、複合共振器では結晶端面の片側を内部反射鏡として、わずかな隙間を開けて出力鏡を配置した構成になっている。この全反射鏡、内部反射鏡と出力鏡の相互作用により、マイクロチップレーザーにおける発振モードの制限効果をより高めることができ、Tm及びHoレーザーにおいても高出力な単一縦モード発振を実現することが可能となる。

3. 実験装置

Fig.1に今回使用した実験装置の概略を示す⁹⁾。レーザー結晶は、6%のTmと0.6%のHoを母材結晶のYLFにドープしたものである。励起用LDは、ファイバ付きのLDを使用した。ファイバ出射端での最大出力は 1W である。また、LDの励起光の中心波長はTm:YAG, Tm, Ho:YLFレーザーなどに対して吸収のピークとなる 785nm である¹⁰⁾。YLF結晶を用いた本研究では、 785nm は必ずしも最適な励起光源では

Fig.1 An experimental setup for a Tm, Ho:YLF microchip laser with a double cavity configuration.

ないが、従来からこれを用いた関係上、本研究においても全ての実験について中心波長 785nm のこのLDを使用した。ファイバから出力されたLD光は焦点距離 10mm のアクロマティックレンズ対によってレーザー結晶上に集光された。結晶端面における励起光源のスポットサイズは、ファイバのコア径と同等の $150\mu\text{m}$ であった。また、励起光の偏光方向と c 軸が平行な π 偏光で励起した。本研究での、共振器構成は3ミラー構成であり、厚さ 0.7mm のレーザー結晶に、約 $200\mu\text{m}$ の間隔を空けて、 $2\mu\text{m}$ に対する反射率99%の第3のミラーとして出力鏡を設置した。従って共振器長は約 0.72mm になる。第3のミラーは、結晶ホルダを介してPZT素子に接続されており、PZT素子に電圧を印可することによって、約 $200\mu\text{m}$ のエアギャップ長を制御することが可能になる。このことにより、単一縦モード出力の高出力化、発振波長の安定化および可変化が可能となる。結晶温度は、銅製の結晶ホルダに接続されたペルチェクーラで制御される。3ミラーのマイクロチップ共振器は、全体として1個のペルチェ素子の上に設置されており、外気温度の変動は回避できるようになっている。しかし、注入パワーを変えると結晶長が少し変わるので、必要に応じて、PZTへの印可電圧を変えて同一発振波長を維持するようにした。

cwレーザー出力は、熱電推型のパワーメータで、発振波長は、分解能 0.2nm の分光器で計測し、発振波長の縦モードはFSR 10GHz のファブリーペロ干渉計で実験中常時モニタした。また、本レーザーの相対的波長安定性は、自己ビート法により測定を行った。レーザー出力をビームスプリッターにより2つに分割し、一方に長さ 300m の石英製シングルモード光ファイバで約 $1.5\mu\text{s}$ の時間遅延を与えた。これらのレーザー出力を再度結合し、InGaAs光検出器で出力の測定を行った。この出力信号波形をスペクトル解析することによりビート周波数を求め、遅延時間内におけるレーザー出力の周波数安定度を求めた。この測定を10分間継続したところ、周波数安定度は、常温動作で約 350Hz 以下であった。また、レーザー発振の横モードは、赤外線カメラを用いて単一横モード(TEM_{00} モード)であることを確認した。

4. 実験結果

4.1 複合共振器を用いた場合と単一共振器を用いた場合のHoレーザーの入出力特性

Fig.2にTm, Ho:YLF結晶に複合共振器を付与した場合と付与しない単一共振器を使用した場合のレーザー入出力特性を示す⁹⁾。単一共振器の装置構成は、レーザー結晶部分以外については複合共振器の場合と同様である。単一共振器は従来型のマイクロチップ共振器の構成になっており、出力側の結晶端面にレーザー波長に対して反射率99%の多層膜コーティングを施している。そのほかの励起光源の入力および温度制御はどちらについても全く同様に行い、結晶温度は常温を維持した。複合共振器を用いた方が高い出力においても単一縦モード発振を維持しており、単一縦モード発振出力は複合共振器の方が3倍大きいという結果が得られた。スロープ効率はほとんど同じであり、発振しきい値は複合共振器の方が小さい。これは、3ミラーの共鳴効果により、共振器のQ値が波長に対して周期的に変化することで波長選択性が高まり、特定の波長で発振しきい値が小さくなったと思われる⁸⁾。またこの共鳴効果が、発振波長の選択性を向上させ、結果として単一共振器の場合と比べてより高い出力まで単一縦モード発振を維持している理由と考えられる。

実験は、ベルチエ素子の電流を制御し、計測温度を20°Cに保って行った。発振波長の制御は行わなかった。ただ、各測定点で、発振波長をモニタした。実験結果から、分かるように、複合共振器を用いた場合は、30mWまで単一縦モード発振を維持していた。これに対し、単一共振器の場合は、出力が7mWを越えると2モードでの発振になってしまう。単一共振器は結晶温度を下げて利得波長領域の幅を制御する以外に縦モードの制御ができないので、常温発振の場合では、単一縦モード発振の高出力化は難しくなる。どちらの共振器を用いても、スロープ効率はほぼ同じで、発振しきい値のみが複合共振器の方が小さい。スロープ効率がどちらの共振器形態に取っても同じということ

Fig.2 Output power of a Tm, Ho:YLF laser for both cavity configurations in the single mode oscillation as a function of the absorbing power. The crystal temperature was kept at room temperature and the distance of the air gap was fixed at a value of 200 μm during experiments.

は、3ミラーの共鳴効果が、励起、発振のプロセスに影響を与えず、単にロスが少ない波長選択素子としてしか機能していないことを示すものである。これらのことは、複合共振器構成が高出力単一縦モード発振に対して重要な役割を果たしていることを明確に示している。

複合共振器の場合、低出力の領域では2モード発振が観測されても共振器長を変化させて発振波長を微調整して共振器の波長特性に対して最適な位置、すなわちピーク波長付近にすると再び単一縦モード発振となるが、今回実験で得られた単一縦モードの最高出力30mWを越えるような領域では、共振器長を調整しても、もう単一モード発振には戻らないことが分かった。注入パワーを上げることで競合するモードの利得も十分に高くなり、3ミラーの共鳴効果をもってしても発振を抑制することができない状態になっている。ここで用いた複合共振器は内部反射鏡と出力鏡によって構成されているが、内部反射鏡は結晶面を研磨しただけのノーコート面であり、反射率の最適化を考慮して複合共振器を設計したわけではない。ノーコート面のフレネル反射率はYLF結晶の場合約3.7%であるが、この面に高反射率の多層膜コーティングを施して共振器のQ値を高くすることで複合共振器の波長特性を変化させることができる。従って内部反射鏡の反射率を変えることで複合共振器の波長選択における特性を最適化できる可能性がある。

4.2 波長可変性

前述したように出力鏡はPZT素子を介してホルダに取り付けられているため、PZT素子への印可電圧を変化させることにより共振器長を変化させて発振波長をシフトさせることができる。そこでこの複合共振器の波長可変性の特性を測定した。励起用LDの入力を固定し、結晶温度を常温に保ったまま、ファブリペロ干涉計で単一縦モード発振を確認する。その後、出力鏡が取り付けられているPZT素子への印可電圧を変化させて、共振器長を波長オーダで変化させた。この結果、単一縦モードを保ったまま、発振波長はシフトした。発振波長が連続的に変化する領域は限られており、それ以上に印可電圧を変化させていくと、発振モードの競合による2モード発振が起こり、単一縦モード発振が得られなかった。単一縦モードで連続的に波長が変化する範囲は吸収パワー(出力パワー)によって異なっている。Fig.3に吸収パワーに対する波長同調範囲の周波数と波長範囲を示す。ファブリペロ干涉計によって観測された周波数のシフト量を波長換算することにより、この波長シフト量は、最大で0.2nmと求められた。吸収パワーが上昇するに従って波長同調範囲は狭くなっている。これは吸収パワーが上がることにより、全体の利得が向上して隣接するモードが発振しやすくなることが原因として考えられる。前節で述べたように、複合共振器における共振器のQ値は内部反射鏡の反射率によって変化する。従ってこの内部鏡の反射率を変えることによって波長同調性の特性も変化するものと考えられる。

また、我々は同一仕様のレーザー結晶、励起光学系を用いたマイクロチップ共振器での温度制御による波長可変

Fig.3 Tunability of the oscillation wavelength for the double cavity configuration as a function of the output power. The distance of the air gap was fixed at a value of 100 μm .

性の測定も行っており、波長同調範囲として最大0.4nmを得ている。これに比べるとFig.3の結果では波長同調範囲は狭くなっているが、波長制御方法に電氣的制御を用いているため、発振波長の高速制御が容易であり、フィードバック制御による発振波長安定化等への応用も容易である。

この他のマイクロチップレーザーの波長制御方法としては吸収パワーの制御がある。Killingerらによって、Tm, Ho:YAGマイクロチップレーザーに対して吸収パワーを制御して発振波長を変える実験が行われており、最大4GHz(約0.057nm)の波長シフト量を得ている。しかしこの方式では発振波長と出力を独立して制御することはできない¹¹⁾。

4.3 高反射率型複合共振器との比較

4.1, 4.2節で述べたように、複合共振器の単一波長発振特性は内部反射鏡の反射率に大きく依存している。そこで内部反射鏡に多層膜コーティングを施し、高反射率型共振器の単一縦モードの発振特性を測定し、前節までの低反射率型複合共振器との比較を行った。

装置の概略は低反射率の場合とはほぼ同様であるが、低反射率型複合共振器では3.7%の内部鏡の反射率が99%になっている。また、励起光源は4.1および4.2節で用いたLDとは別のものである。本節の実験では、波長781nmのLDを集光光学系によってレーザー結晶上に集光している。このときの集光スポット径は約 $170 \times 40 \mu\text{m}$ であった。さらに同一条件において出力鏡を取り外した構成の単一共振器の特性特定も行った。

Fig.4に低反射率型共振器との入出力特性の比較を示す¹²⁾。両者の共振器における励起光源の条件が若干異なるため、双方の単一共振器における出力特性を基準に規格化を行っている。両者の発振しきい値を比較すると、80%程度に下がっている。これは内部鏡の反射率が高くなったことにより、3ミラーの共鳴効果が上がったためと考えられる⁸⁾。その結果、より高効率、かつ高出力の単一縦モード発振が得られた。

また、この高反射率型共振器での単一縦モード発振における波長同調範囲の出力パワー依存性の試験を行った。

Fig.4 Comparison of the lasing performance using the double cavity configuration with two inner mirrors of the different reflectivity.

測定方法は低反射率型共振器の場合と同様である。Fig.5に、低反射率型共振器における結果と併せて示す。両者の結果は出力パワーで規格化して示されている。高反射率型共振器の場合も低反射率型共振器の場合と同様に、出力パワーの増加に伴い波長同調範囲が狭くなっている。また、同一出力パワーにおける波長同調範囲を両者の共振器で比較すると、高反射率型共振器の方が1/4程度に狭くなっている。これは複合共振器のQ値が高くなったことにより、共振器長の変化に対する出力特性の変化がシビアになったためと考えられる。このような高反射率型複合共振器では共振器長を調整することによりレーザー発振の抑制が可能であり、PZT素子などを用いて発振のON/OFFを高速に切り変えることにより、Qスイッチングによるパルス動作が可能となる。この方式によるQスイッチングは通常のQスイッチレーザーで用いるポッケルス素子や過飽和吸収体などが不必要であり、マイクロチップレーザーのような小型レーザー装置のさらなる小型化に重要な手法である。このようなアイデアの実験結果は複合共振器型Nd:YAGマイクロチップレーザーなどで報告されており¹³⁾、

Fig.5 Comparison of the tunability using the double cavity configurations with two inner mirrors of the different reflectivity. Experimental conditions were same as in Fig.4.

本研究で用いた複合共振器型Tm, Ho:YLFマイクロチップレーザーにおいてもパルス動作の可能性が期待される。

以上の結果から、広い波長同調範囲が要求される応用では低反射率型共振器が、比較的狭い同調範囲でより高い出力が要求される応用では高反射率型共振器が適しているという傾向が見られた。いずれの場合にしても内部鏡反射率の最適化を行う余地があり、内部鏡反射率をより細かく変化させてその単一波長発振特性を詳細に計測することにより、最適な反射率が明らかになるものと考えられる。

5. まとめ

マイクロチップTm, Ho:YLFレーザーに複合共振器を用いることによって単一縦モード出力30mWを得た。これは同一条件での単一共振器における単一縦モード出力の約4倍である。また、複合共振器の共振器長を制御することにより、最大15GHzの範囲での波長同調を達成した。共振器長制御にはPZTを用いているため、電氣的に高速かつ安定した制御が可能である。

さらに内部鏡の反射率を高反射率型にしたときの発振特性を測定し、発振しきい値、波長同調特性等における内部鏡反射率依存性を明らかにした。

謝 辞

本研究の一部は通信総合研究所の支援を受けて行われた。また、本研究の遂行に当たり貴重な助言を頂いた岡山大学古賀教授に感謝致します。

参考文献

- 1) L. F. Jhonson, G. D. Boyd, and K. Nassau: *Proc. IRE* **50** (1962) 87. および L. F. Jhonson: *J. Appl. Phys.* **34** (1963) 897.
- 2) L. F. Jhonson, J. E. Geusic, and L. G. Van Uitert: *Appl. Phys. Lett.* **7** (1965) 127.
- 3) L. Esterowitz: *Opt. Engineering* **29** (1990) 676.
- 4) T. Y. Fan and R. L. Byer: *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-24** (1988) 895. など.
- 5) C. D. Nabors, J. Ochoa, T. Y. Fan, A. Sanchez, H. K. Choi, and G. W. Turner: *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-31** (1995) 1603.
- 6) J. J. Zayhowski: *The Lincoln Laboratory Journal* **3** (1990) 427.
- 7) A. Di Lieto, P. Minguzzi, A. Toncelli, M. Tomelli, and H. P. Janssen: *Appl. Phys.* **B58** (1994) 69.
- 8) T. Taira, T. Kobayashi, W. M. Tulloch, and R. B. Byer: *OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers* **1**, S. A. Payne and C. Pollock (eds.) (1996) 14.
- 9) J. Izawa, H. Nakajima, H. Hara, and Y. Arimoto: *Proc. 20th Japanese Laser Sensing Symposium, 1999* (Laser Radar Society of Japan, 1999) p.257.
- 10) T. Y. Fan, G. Huber, R. L. Byer, and P. Mitzscherlich: *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-24** (1988) 924.
- 11) C. He and D. K. Killinger: *Opt. Lett.* **19** (1994) 396.
- 12) 伊澤 淳, 中島 勇人, 原 熙, 有本 好徳: 第47回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 30p-YE-10 (2000) p.1075.
- 13) J. J. Zayhowski: *OSA Proc. on Advanced Solid-State Lasers* **10 G**, Dube and L. Chase (eds.) (1991) 265.