側面励起型高出力Yb:YAGコンポジットディスクレーザー

山本 修平, 柳澤 隆行, 平野 嘉仁

三菱電機(株)情報技術総合研究所(〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船5-1-1)

High Power Side-Pumped Yb:YAG Composite Disk Laser

Syuhei YAMAMOTO, Takayuki YANAGISAWA, and Yoshihito HIRANO

Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-1, Ofuna Kamakura, Kanagawa 247-8501

(Received November, 12)

Thin disk geometry for laser active medium has advantages for high-average-power operation with good beam quality. However it is difficult to obtain high pumping efficiency due to the small thickness of the crystal. To improve the pumping efficiency, we have developed a side-pumped Yb:YAG/YAG composite disk laser with a stacked-LD tight-focusing technique. The maximum output power was 235-W from one disk with the optical efficiency of 0.38.

Key Words: Lasers, Solid-state, Diode-pumped, Disk laser, Yb:YAG

1. はじめに

高出力の固体レーザーでは、レーザー媒質の発生熱による熱レンズ、熱複屈折、熱歪みが発生し、効率やビーム品質を劣化させるという問題がある。このため、様々な固体レーザー媒質の形状、および、励起方式が提案され、高出力化、高輝度化の研究が行われてきた。今回、我々はコンポジット構造をもつ薄ディスク型Yb:YAGを用いた、高出力レーザー装置の開発を行った。ディスク型固体レーザーは、発生熱をレーザー光軸方向に排熱する構成により、温度勾配がレーザー光軸方向に発生するため、理想的にはレーザー光断面方向に屈折率分布が発生しない。このため、励起パワーの変化によるビームモードの変化やビーム品質の劣化が少なく、出力の拡張性や、高出力、高ビーム品質レーザー光の発生に適した方式として期待されている。

本稿では、高出力レーザーとしての固体レーザー媒質の形状ごとの特徴、および、Yb:YAG薄ディスクレーザーの現状について示した後、側面励起型Yb:YAGコンポジットディスクレーザーの開発結果について紹介する。

2. 各種固体レーザー媒質の形状と特徴

固体レーザー媒質の形状は、主に、(1)ロッド型、(2)スラブ型、(3)ファイバー型、(4)ディスク型に大別できる。それぞれの形状ごとの主な特徴と近年の進展は以下の通りである。

2.1 ロッド型

ロッド型は、製作、保持などが簡便なことから、固体レーザーとしては、現在、最も一般的な構成である。レーザー光は円形ロッドの中心を伝搬し、排熱はロッドの側面から行われる。側面全体から排熱を行うことが可能なため、冷却が容易であるが、ロッドの中心から側面に向けての温度勾配が発生し、ロッド断面内で温度や光弾性効果に基づく屈折率分布が生じる。これがロッド内を通過するレーザー光にレンズ効果や複屈折効果といった光学的な歪みを与え、高出力動作時のビーム品質や出力効率を劣化させるという問題がある。ロッド型固体レーザーの高出力動作では、Nd:YAGロッドを6本直列に配置することにより、出力12 kWが電気効率23%で得られている¹⁾。また、熱レンズ、および、熱複屈折を2本のロッドと90度ローテータで補償することにより²⁾、 $M^2=2.2$ で532 WのQスイッチ出力³⁾や、 $M^2=1.1$ で出力200 Wの超高輝度動作⁴⁾が報告されている。

2.2 スラブ型

スラブ型では、対向した二つの側面から励起光を入射し、それに垂直な二つの側面から排熱を行う構成が一般的である。この構成の特徴は、温度勾配がスラブの排熱方向にのみ生じることである。これにより、光学的歪みの異方性がスラブの排熱方向、および、排熱方向に直交した方向にのみ発生するため、直線偏光のレーザー発振が容易に得られる。また、側面が平面のため、結晶の保持、および、冷却が容易である。さらに、GE社のMartin等により考案されたジグザグスラブ方式⁵⁾では、冷却面

間を1往復したときの位相変化が、レーザービーム内の全ての点において平均化され、理想的には熱レンズ効果が発生しない。従って、レーザー媒質内での熱的に発生する光学歪みの補償という点で、本発明は理想的には非常に優れている。しかし、多数回のジグザグ反射を用いるため、反射面の平行度、面精度への要求が厳しく、製作性が悪くなるとともに、発生熱による反射面の変形がレーザービームに波面収差を与える問題もある。また、平面で囲まれているため、高出力励起時には寄生発振の抑制が課題となる。高出力動作では、Nd:YAGスラブで単機出力6.1 kW、2機合成出力10.2 kW、電気効率20.1 %が報告されている⁶⁾。また、高輝度動作ではNd:YAGで連続出力380 W、光-光変換効率34 %、 $M^2=1.8$ が、Yb:YAGで連続出力228 W、光-光変換効率18 %、 $M^2=1.27 \times 1.44$ ⁷⁾が報告されている。

2.3 ファイバー型

ファイバー型は、ロッドに比べてアスペクト比が非常に大きいので、単位長さあたりの熱負荷が小さく、大きな利得が得られる。このため、熱的な出力制限が緩く、高出力化が容易である。また、誘導放出断面積の小さな活性イオンを用いた場合でも、高効率なレーザー発振が可能である。さらに、モードが導波路により形成されるため、熱によるビーム品質の劣化がほとんど無く、高輝度・高効率動作が可能である。一方、コア径が小さいため、コア内のパワー密度が大きくなり、特に高ピークのパルス動作では、端面破壊や非線形効果により出力が制限される。このため、高出力化は主に連続(CW)動作で行われており、コア径の大きなファイバーを用いてパワー密度を低減したり⁸⁾、エンドキャップ構造を施したりすることによりダメージを克服している。また、高い利得のため戻り光などの影響を受けやすいなどの課題もある。近年の報告としては、マルチモード動作で出力10 kW級レーザー装置が市販されており¹⁾、高輝度動作では出力1.3 kW、 $M^2 < 3$ ⁸⁾が報告されている。ファイバーレーザーは、CW動作においては最も輝度の高いレーザーに発展している。

2.4 ディスク型

ディスク型は、ジグザグスラブと同時期に、同じGE社のAlmasi等により考案された⁹⁾。励起構成やディスク形状等の違いにより、アクティブミラー、シン(薄)ディスク¹⁰⁾、マイクロチップ^{11, 12)}と呼ばれることもある。本方式の特徴は、レーザー光軸と排熱方向が同方向で、温度勾配がレーザー光軸方向に発生するため、レーザー光の断面内に屈折率分布が生じないことである。従って共振器の設計で励起パワーによる熱レンズの変化を考える必要がなく、利得を持った反射ミラーとしてディスク枚数を増やすことができるので、パワースケーリングが容易である。一方で、ディスク内の発熱分布がそのまま温度分布となるため、励起分布が均一でない場合には、温度差に起因する屈折率分布による収差が発生する。また、厚さが薄いので、応力による光学的な歪みが発生しやす

い。さらに、薄いレーザー媒質に高効率に励起光を吸収させることが課題となっている。近年の報告としては、Giesen等により、端面励起方式で出力1 kWが報告されており¹⁰⁾、同方式で4 kW級レーザー装置が市販されている。

3. Yb:YAG薄ディスクレーザーの現状

Yb系固体レーザー媒質は、励起波長とレーザー発振波長が近く、ストークスシフトに起因する原子量子効率が低い。また、レーザー上位準位より上の準位を持たないため、アップコンバージョンがほとんど存在せず、量子効率が低い。従って、励起による発熱が小さく、高出力・高効率動作に適している。特に、Yb:YAGは熱伝導率が高く温度上昇を最小限に抑えることができるので、次世代の高出力・高効率レーザーとして期待されている。

また、Yb:YAGは、利得幅が広いことから超短パルスの発生が可能であり、ホストによる違いでさらに広い利得帯域が得られる。また、薄ディスク形状では、レーザー光軸方向の伝搬長が小さいことからレーザー媒質上での波長分散が小さく抑えられ、超短パルス発生に適している。Yb:YAG薄ディスクでは、平均出力60 Wのモードロック出力が810 fsで得られ¹³⁾、Yb:KYWでは、71 fsの超短パルス光の発生が報告されている¹⁴⁾。LDにより直接励起ができないTi:Sapphireに比べて、小型、高効率な超短パルスレーザーを製作することが可能である。

一方、Yb系固体レーザー媒質は、準3準位系のエネルギー準位を有するため、利得を生じさせるためには下準位吸収を飽和させる必要がある。従って、常温動作では高密度励起が必要であり、発熱密度が高くなることからレーザー媒質の温度が上昇しやすい。さらに、レーザー媒質の温度上昇に伴い利得が低下するため、高効率動作のためには効率的な排熱が課題となる。薄ディスク型レーザー媒質では、薄ディスクの広い排熱面から厚さ方向に冷却を行うため、レーザー媒質の温度上昇は最小限に抑えられる。このため、準3準位系レーザー媒質であるYb:YAGに適した構成である。

レーザー媒質の温度上昇を考えた場合、厚さはできるだけ薄いことが望ましい。しかし、薄い結晶に高出力の励起光を吸収させることが課題となる。Yb:YAGではYb³⁺のイオン半径がY³⁺のイオン半径に近いので、Yb³⁺の高濃度添加が可能であり、濃度消光が起きにくい。高濃度添加のYb:YAGを用いれば、1 atm%のNd:YAGなどと比べても数倍高い吸収係数を持つことが可能であるが、媒質厚さが100～400 μm程度の薄ディスクにおいては、端面からのダブルパルス励起では、十分な吸収長が得られず、また、側面励起では、薄いディスクの側面に輝度の低い高出力LD光の出力を集光する必要があり、高効率に励起光を吸収させることが困難である。このため、励起構成について様々な方式が提案されている。

端面励起方式では、Fig. 1のマルチパス端面励起方式¹⁰⁾のように、ファイバーから出射した励起光をパラボラミラーで薄ディスク端面に複数回集光することにより、吸収長を増加させ、高効率吸収を実現している。側面励起

Fig. 1 Principal setup of the quasi-end pumped geometry.¹⁰⁾

方式では、Fig. 2に示すように、比較的輝度の高いファイバー結合型LDの出力をレンズで集光し、ディスクのエッジから励起を行う方式^{15,16)}や、レンズダクトを用いてディスクの側面から励起を行う方式¹⁷⁾が提案されている。側面からの励起では、ディスク厚さによらず長い吸収長が得られるため、高い吸収率が容易に得られる。しかし、励起光を導入する側面の面積が小さいため、例えば、励起源として発光面積の大きいスタックLDを用いて高出力化をはかることが難しい。ディスクの厚さを厚くすれば入射効率を上げることが可能であるが、薄ディスクレーザー媒質の表面温度は厚さに比例して増加するため、利得を低下させ、効率を低下させてしまう。このためレーザー媒質の厚さを厚くすることなく高効率に励起光を入射する励起方式の開発が課題であった。

4. 側面励起型高出力Yb:YAGコンポジットディスクレーザーの開発

4.1 励起構成

Fig. 3に、今回開発したYb:YAG ディスクレーザーの励起構成を示す。Yb:YAGディスク表面にUndoped YAGディスクを接合したコンポジットディスク構成とすることで、Yb:YAGの厚み増加にともなう温度上昇を抑えると同

Fig. 2 The microchip composite Yb:YAG laser.¹⁶⁾

Top view

Fig. 3 Configuration of side-pumped Yb:YAG disk module.

時に、励起光を導入する側面の面積を拡大して、励起光の入射効率の向上をはかった。コンポジットディスクは、サイズが $8 \times 4 \times 0.4$ mmであり、0.1 mm厚、濃度10 atm%のYb:YAGに、0.3 mm厚のUndoped YAGを光学的に接合して製作した。コンポジットディスクの上下面には、入射角度 60° でのレーザー光(1030 nm)に対するARコート、HRコートをそれぞれ施し、アクティブミラーとして動作させる。励起光源には、スタックLDの高集光技術⁴⁾を適用した。波長940 nmの速軸コリメータ付きの6バースタックLDを2個対向させ、速軸・遅軸2枚のシリンドリカルレンズにより9.5 mm(速軸方向) $\times$ 10 mm(遅軸方向)の発光面積を、コンポジットディスク側面上で0.4 mm $\times$ 4 mmに縮小することで、微小側面からの励起を可能とした。励起光の速軸方向は、LDバーごとに速軸コリメータレンズで平行化した後に、速軸集光レンズで一括集光し、波長940 nmのARコートが施されたコンポジットディスクの励起光入射側面からコンポジットディスク内に入射する。速軸コリメータレンズ後の励起LD出力からコンポジットディスク内への輸送効率は93 %である。コンポジットディスク内に入射した励起光は、それぞれのLDバーごとに異なる角度でコンポジットディスク内の上下面間で反射しながら伝搬し、Yb:YAG部を通過する際に吸収される。従って、Yb:YAG部とUndoped YAG部の厚さの比を変えることにより、実効的な吸収係数を調整することが可能である。製作したコンポジットディスクはYb:YAGとUndoped YAGの厚さの比が1 : 3であるため、実効的な吸収係数は濃度10 atm%のYb:YAGの1/4となる。このときの吸収飽和を含まない小信号吸収効率は、測定では87 %であった。

4.2 冷却構成

Fig. 4にYb:YAGディスクレーザーの冷却構成を示す。0.1 mm厚のYb:YAGディスクを用いた0.4 mm厚のコンポジットディスクとしているため、0.4 mm厚のYb:YAGディ

Fig. 4 Configuration of cooling system.

スクである場合に比べ、Yb:YAG部での温度上昇を1/4に低減している。HRコートは、誘電体多層膜に銅薄膜を施すことで、高反射率を維持したまま、熱伝導率の低い誘電体多層膜の厚さを低減している。コンポジットディスクは、マイクロチャネルで水冷却した銅のヒートシンクに導電性接着剤を用いて固定し、高い熱伝導率を実現するとともに、ディスクにかかる応力を接着剤の弾力性により低減している。レーザー発振光は入射角度60°でディスクに入射し、発振光に対する見かけの光束径を保ったまま、ディスクの大きさを2倍に拡大している。これにより、発熱密度を1/2とし、Yb:YAGの温度上昇を低減した。

Fig. 5にディスク中心付近での厚み方向の温度分布の測定結果を示す。測定では非接触の温度センサを用いた。最大励起LD出力626 W(速軸コリメータレンズ後)時、冷却水からYb:YAGディスク上面までの全温度上昇は94 °C、100 μm厚のYb:YAG部における温度上昇は15 °Cであった。同じ励起密度の400 μm厚のYb:YAGを用いた場合、Yb:YAG部における温度上昇は60 °Cとなるため、コンポジットディスク構造とすることにより45 °Cの温度低減をはかった。

4.3 開発結果

Fig. 6に励起分布の測定結果を示す。励起光伝搬方向の励起分布は、入射角度の異なる各励起光の合成の分布となるため、全体としてはほぼフラットであるものの、小さいピッチで強弱のある分布であることが確認された。また、励起光の遅軸方向の励起分布は、遅軸方向の集光点における強度分布を反映し、中心が強い山型の分布になることが確認された。

Fig. 7にマルチモード動作におけるレーザー入出力特性

Fig. 5 Temperature rise without oscillation.

Fig. 6 Pumping distribution.

を示す。出力鏡反射率96.5%，凹面の全反射鏡曲率0.3 m、共振器長73 mmとした。励起LD出力626 W時にレーザー出力235 Wがスロープ効率42%，光-光変換効率37.5%で得られた。励起光の吸収飽和とYb:YAGの温度変化による利得の変化を考慮したレート方程式による計算結果と良い一致を示した。このときの光束伝搬因子 M^2 は、152(長軸方向)×65(短軸方向)であった。

さらに、共振器長、および、全反射鏡曲率の条件を変えることで、モード選択開口として用いているYb:YAGディスク上の光束モードサイズを変更し、異なる光束モードでの動作を行った。Table 1に最大励起LD出力626 W時の、各光束モードにおける光束伝搬因子 M^2 とレーザー出力の測定結果を示す。発振光が低次モードになるに従いレーザー出力が低下し、 $M^2=11\times10$ でレーザー出力は110 W、 $M^2=3.8\times6.2$ で出力49 Wであった。低次モード動作時にレーザー出力が低下する要因として、励起時のディスク面内の波面収差の増加が上げられる。Zygo干渉計で測定した反射往復時の波面収差は、未励起時には0.1 λ(rms) ($\lambda=1030$ nm)以下と小さいものの、励起時には温度差によりディスク面全体で0.4 λ(rms)にまで増加する。これに加え、Fig. 6に見られる励起光伝搬方向の不均一な励起分布が温度分布を作り、ディスク面内に高次の波面収差を発生させている。このために、低次モードでは損失が増加し、出力の低下を招いていると考えられる。ロッド型やスラブ型では、排熱方向が光軸と直交しており、励起分布の高次の不均一さが、波面収差として発振光に与える影響は小さい。一方、薄ディスク型では、温度分布を形成し波面収差を与えるため、高次の不

Fig. 7 Laser output results: Multimode operation.

Table 1 Beam propagation factor dependence of laser output power.

LD output power (W)	Beam propagation factor :M ²	Laser power (W)
626	152×65	235
	87×41	208
	50×28	189
	19×18	127
	11×10	110
	5.1×8.4	60
	3.8×6.2	49

均一成分が熱伝導を通じて媒質内に波面収差を形成することが問題となる．このため，他の媒質形状と同様に，均一な励起分布を実現することが課題である．

5. まとめ

固体レーザー媒質の形状と励起方式のこれまでの進展について説明し，薄ディスクレーザー媒質の特徴と課題について示した．また，高出力スタックLDによる高効率励起が可能なYb:YAGコンポジットディスクを用いた，側面励起型高出力Yb:YAGディスクレーザーの開発を行い，CW出力235 W，光-光変換効率37.5 %の高出力動作結果について述べた．開発において，励起分布に依存して発生するディスク面内の温度分布による高次の波面収差が，低次モード動作の出力低下を発生させ，他の励起方式と同様に，均一な励起分布を実現することが，ディスクレーザー開発の大きな課題であることが分かった．

参考文献

- 1) 湯浅 広士, 秋山 靖裕, 高田 弘之, 西田 直人: レーザー研究 **31** (2003) 508.
- 2) W. C. Scott and M. Dewitt: Appl. Phys. Lett. **18** (1971) 3.
- 3) E. C. Honea, R. J. Beach, S. C. Mitchell, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel, S. B. Sutton, S. A. Payne, P. V. Avizonis, R. S. Monroe, and D. G. Harris: Opt. Lett. **25** (2000) 805.
- 4) Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto, K. Kasahara, and T. Tajima: Opt. Lett. **24** (1999) 679.
- 5) W. S. Martin and J. P. Chernoch: US Patent no. 3,633,126 (1972).
- 6) 西川 祐司: レーザー研究 **31** (2003) 513.
- 7) G. D. Goodno, S. Palese, J. Harkenrider, and H. Injeyan: OSA TOPS **50** (2001) 2.
- 8) A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer, A. Tunnermann, V. Reichel, K. Morl, S. Jetschke, S. Unger, H.-R. Muller, J. Kirchhof, T. Sandrock, and A. Harschak: Postdeadline paper CLEO (OSA, 2004) CPDD2.
- 9) J. C. Almasi and W. S. Martin: US Patent no. 3,631,362 (1971).
- 10) C. Stewen, K. Contag, M. Larionov, A. Giesen, and M. Hugel: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **6** (2000) 650.
- 11) J. J. Zayhowski and P. L. Kelley: IEEE J. Quantum Electron. **27** (1991) 2220.
- 12) T. Taira, A. Mukai, Y. Nozawa, and T. Kobayashi: Opt. Lett. **16** (1991) 1955.
- 13) E. Innerhofer, T. Sudmeyer, F. Brunner, R. Haring, A. Aschwanden, R. Paschotta, C. Honninger, M. Kumkar, and U. Keller: Opt. Lett. **28** (2003) 367.
- 14) H. Liu, J. Nees, and G. Mourou: Opt. Lett. **26** (2001) 1723.
- 15) T. Dascalu, T. Taira, and N. Pavel: Opt. Lett. **27** (2002) 1791.
- 16) T. Dascalu, N. Pavel, and T. Taira: Appl. Phys. Lett. **83** (2003) 4086.
- 17) L. E. Zapata, R. J. Beach, and S. A. Payne: Tech. Dig. CLEO (OSA, 2001)p. 334 paper CWF3.