石英光ファイバを用いたLD励起中赤外YSGGレーザーの出力特性

大森 繁

テルモ(株) 研究開発本部 (〒259-0151 神奈川県足柄上郡中井町井ノ口1500)

Diode-Pumped Mid-Infrared YSGG Laser Performance with Silica Optical Fiber

Shigeru OMORI

R&D Headquarters, Terumo Corporation, 1500 Inokuchi, Nakai-machi, Ashigarakami-gun, Kanagawa, 259-0151

(Received August 9, 2013)

We demonstrated laser operation at 2.8 μm in a monolithic Er, Cr: YSGG laser pumped by a laser diode with a silica optical fiber. Under a condition where the pumping beam spot sizes ranged from 90 μm to 140 μm using a 100- μm or a 200- μm core diameter fiber, we achieved maximum slope efficiency. During continuous operation, the output power reached 1.09 W at an incident power of 4.5 W without any active cooling. When the laser diode is driven by a square wave current where the repetition frequency ranged from 10 Hz to 10 kHz, the average output power of the higher frequency with a lower duty ratio decreases because of the delay of the pulse start timing.

Key Words: Solid-state laser, Er,Cr: YSGG, Diode-pump, Optical fiber, Modulation

1. はじめに

波長3 μm 前後の中赤外レーザー光は水に対する吸収が優れ、生体組織の蒸散に向くことが知られている。この波長帯を出力するレーザーデバイスとしては、GaInAsSb-GaSb半導体レーザー¹⁾や非線形光学素子を用いたパラメトリック発振²⁾、あるいはCr²⁺:ZnSe/Sファイバレーザー³⁾等が挙げられるが、実用面ではフラッシュランプ励起のErドープ固体レーザーが歯科用を中心として応用展開されている⁴⁾。固体レーザー結晶は、Er:YAGもしくはEr, Cr:YSGGが用いられるが、この波長帯は石英材の透過率が低いため、導光系にはフッ化物ファイバや中空ファイバ⁵⁾が使用される。これに対し、石英光ファイバの先端部に固体レーザー結晶を実装し、半導体レーザー(LD)を励起光として先端部まで導いて発振させる光ファイバ先端発振型固体レーザーが提案されている⁶⁾。石英光ファイバを用いることで、ビームデリバリーが容易となり、実用上のメリットは大きいものと考えられる。光ファイバ先端部に実装する固体レーザーヘッドのサイズを小さく抑えるためには、チップサイズのレーザー結晶を用い、特別な温度制御手段は無いことが望ましい。そのためには、用いる固体レーザー結晶の選定と、発振効率の良い励起条件を見出すことが重要となる。

LD励起による3 μm 前後の固体レーザー発振は、1987年頃より報告され、レーザー結晶としては、これまでEr:YLF⁷⁻⁹⁾、Er:YSGG、Er:GGG、Er:YAG^{10,11)}等が用いられてきた。筆者は、フラッシュランプ励起用として入手が容易なEr, Cr:YSGGを選定し、ワットオーダーの出力

を得ることを目的とし、その発振特性を調べてきた。本報告では、石英光ファイバ導光のLDで励起する際に高効率な発振が得られる条件とその限界について実験的検討を行った結果を述べる。

2. LDの選定と励起実験系の構成

Er, Cr:YSGGの励起用LDとしては、レーザー遷移における上準位である⁴I_{11/2}へのダイレクト励起により高効率発振が得られる波長として、970 nm前後のマルチモードLDを選定し、温度チューニングにより吸収ピーク波長である波長967 nm付近に中心波長を調整した。石英光ファイバ結合が可能なモジュール形態のLDを数種類選定し、ファイバから出射されるLD光を一旦コリメートレンズ(メレスグリオ製, f 25.6 mm, NA 0.156)で平行ビームにした後、フォーカスレンズ(10倍の顕微鏡用対物レンズ, NA 0.25)を用いて集光し、レーザー結晶端面に結合させた。実験光学系の構成をFig. 1に示す。レーザー結晶は、Er30%, Cr2%ドープのYSGG結晶を用い、入出射端面をフラット/フラット研磨した後、反射コーティングを施してモノリシック共振器とした。コーティングの仕様は、入射面は波長967 nmに対して透過率80%以上、波長2.8 μm に対して反射率99.5%以上のダイクロイック多層膜コーティングを施し、出射面は、波長2.8 μm に対して反射率98.2%のコーティングとした。

レーザー結晶から出射される波長2.8 μm のレーザー出力は、励起波長をカットできるフィルタ(HOYA GV-545)を通して光パワーメーターで測定した。

Fig. 1 Schematic representation of the experimental set up for laser diode pump Er, Cr: YSGG monolithic laser.

3. CW発振特性

3.1 励起光スポット径と発振効率

励起光スポット径が発振効率に及ぼす影響を調べるため、出力1 WのシングルエミッタマルチモードLD(エミッタ幅100 μm , ファイバレセプタクル付き)にNAが同一で異なるコア径の石英光ファイバを接続し、前項で述べた実験系を構成した。用いた石英光ファイバは、NA0.22でコア径が100 μm , 200 μm , 400 μm , 600 μm の4種類であり、ビームプロファイラ(Photon, inc社 Beam Scan)により測定した集光スポット径は $1/e^2$ 径にてそれぞれ、90 μm , 140 μm , 280 μm , 390 μm となった。これら4種の集光ビームプロファイル(光軸に沿ったビーム径変化)をFig. 2に示した。NAが同一にも関わらず、相似形となっていない理由は、ファイバ中の伝搬横モードがそれぞれ異なっているためと考えられる。

これらのファイバを用いた励起実験では、結晶サイズ $\phi 6 \text{ mm}$, 厚み2 mmのEr, Cr:YSGGモノリシック共振器を真鍮製のホルダに上下から挟み込んで固定し、特別な冷却は行わず室温で実施した。Fig. 3に、LD光による励起パワー(フォーカスレンズ後の光パワー)に対する2.8 μm 出力の測定結果を示す。使用した4種のファイバについて、Fig. 3に示した入出力特性における発振しき

Fig. 2 Laser diode focus beam characteristic as a function of the beam diameter using different optical fibers with core diameter of 100 μm , 200 μm , 400 μm , and 600 μm .

Fig. 3 2.8- μm laser output power as a function of laser diode pump power for different optical fibers with core diameter of 100 μm , 200 μm , 400 μm , and 600 μm .

Table 1 Experimental result of 2.8- μm output efficiency (under 1 W of pump power).

Fiber core diameter (μm)	Threshold power (mW)	Slope efficiency (%)
100	119	30.1
200	128	29.9
400	244	18.0
600	345	15.3

い値とスロープ効率をTable 1に示した。光ファイバコア径100 μm , 200 μm については、共にスロープ効率30%, 発振しきい値120 mW前後となり、コア径400 μm , 600 μm のものと比較して高い発振効率を得られている。

コア径200 μm で励起した場合における出力レーザー光のビーム強度プロファイルを結晶端面より12.5 mm位置で測定した結果をFig. 4 (a) (b)に示した。Fig. 4 (b)には、ビームプロファイラを用いてガウシアンフィットさせた結果を2次元表示しているが、比較的良好な整合が得られている。広がり角を内挿して求めた出射端面でのビーム径は110 μm となった。これを D_0 として、距離 $z=12.5 \text{ mm}$ 離れた位置におけるビーム径 $D(z)$ を、ガウシアンビームの場合に成立する式(1)に当てはめて計算すると、420 μm となり、実測値とほぼ一致する。

$$D(z) = D_0 \sqrt{1 + \left(\frac{4\lambda z}{\pi D_0^2} \right)^2} \quad (1)$$

以上のことより、この条件においてはTEM₀₀に近い横モードが得られているものと考えられる。

一方で、コア径400 μm や600 μm ファイバの場合では、出射端面でのビーム径はコア径200 μm の場合と比較して大きくなり、また $D(z)$ と D_0 の関係は式(1)に適合しなくなる。励起スポット径が大きくなると、高次の横モードが混合するものと考えられ、Table 1に示した発振しきい値はその影響を受けた結果であると推測される。

Fig. 4 2.8- μm output laser beam profile using a 200 μm core fiber for propagation of pump source. (a):3-dimensional plot of a beam. (b):2-dimensional plot of a beam overlaying a Gaussian profile and goodness of fit.

3.2 出力限界について

3.2.1 熱によるレーザー結晶の破損

Er, Cr:YSGG結晶の熱伝導率は $0.06 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ であり、Er:YAGの $0.12 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ と比較して1/2以下である。特に、Erドーパント濃度が高い本結晶の場合、励起端面では局所での温度上昇が起りやすいと考えられ、一定以上の励起パワーにおいてクラックが入り、結晶が使用不能となることを経験している。端面励起の本レーザー構成においては、その出力上限は熱による結晶の破損によって制限される可能性があると考えられるため、励起パワーを上げていき、レーザー発振状態において結晶が破損する限界点を確認する実験を行った。

励起光源としては、コア径200 μm のファイバ端で最大8 Wの出力が得られるLDユニットを用いた。レーザー結晶は、放熱効果を高めるため、1.4 mm角(長さ2 mm)にカットし、真鍮製のホルダーへサーモグリスを介して固定した。真鍮製ホルダーはステンレスロッドにネジ止めした上で光学ステージに固定し、温度制御は行わなかった。

幾つかの結晶を用いて実験した結果、励起パワー4.6 Wにおいて、励起開始1分を過ぎた時点で出力がゼロとなり、Fig. 5に示したように結晶にクラックが入るものがあった。また、このような破損が起きなくても、励

Fig. 5 Er, Cr: YSGG crystal (1.4 mm $\times$ 1.4 mm $\times$ 2.0 mm) fractured by the pump power exceeding a limit.

Fig. 6 2.8- μm output power as a function of laser diode pump power during continuous drive using a 200- μm core diameter fiber.

起5 W以上においては出力が飽和する傾向があり、今回用いた実験系のように、金属性ホルダーへの自然放熱を前提とした場合には、励起パワーは4.5 W以下に抑えるのが実用的と考えられる。

3.2.2 最適励起位置における入出力特性

励起パワー上限を4.5 Wとした時の励起光に対する波長2.8 μm レーザー出力を測定した。その際、励起パワー3 W以上においては、励起光の結晶入射端面への最適結合位置(波長2.8 μm 出力が最大となる光軸位置)が、低いパワーで励起した場合と比較して結晶内側へ0.2 mmシフトしたため、励起パワー3.5 Wにおいて最適結合位置の調整を行い、その位置において入出力特性を測定した。結果をFig. 6に示す。3.5 W以上の励起パワーにおいて僅かなスロープ効率の低下が見られたが、4.5 W励起時において1.09 Wの波長2.8 μm 出力が得られた。この出力は励起開始後2分経過後に1.05 Wまで低下した後ほぼ安定した。本実験構成において熱平衡状態に達したものと考えられる。

4. 矩形波変調特性

励起光源であるLDを矩形波変調することにより熱緩和を図り、レーザー結晶の温度上昇を抑えることは実用面において有効な手段と考えられる。

Duty ratio(以下DRとする)10%, 20%, 30%, 50%の矩形波について、繰り返し周波数10 Hzから10 kHzまでLD駆動電流を変化させ、励起レーザー光(LD光)と波長2.8 μm レーザー光の平均出力を測定した。結果をFig. 7 (a) (b)に示す。励起光がこれらの周波数領域においてどのDRに対してもほぼフラットであるのに対し、波長2.8 μm 出力光は、DR30%以下では周波数の増加に伴って、またDR50%の場合には100 Hz以上の周波数において出力が低下する結果となった。

周波数応答性が励起光と異なる原因を調べるため、PbSディテクタを用いてEr, Cr:YSGGの発振時間波形を観察した。その結果、DR50%の場合では、矩形パルスのピークに到達するまでに2.1 msec要し、このため繰り返し周波数200 Hz(Time Duration: 2.5 msec)を超える条件

Fig. 7 Average power during square wave pumping where the repetition frequency ranged from 10 Hz to 10 kHz. (a):laser diode output. (b):2.8- μm output.

Fig. 8 Output waveform at a 100 Hz repetition frequency with 10% duty ratio of square wave current for a laser diode. Upper trace is 2.8- μm output waveform and lower trace is pumping waveform showing the delay of the output pulse start timing.

では平均出力が低下し、更に1 kHz以上では周波数応答限界に達したものと考えられた。また、パルス間隔が広い場合では、矩形パルスを入力タイミングと発振の開始タイミングとが同期せずDelayが観察された。例えば、パルス間隔が9 msecとなる繰り返し100 Hz, DR10%の条件では、発振開始タイミングの遅延時間は0.9 msecであった(Fig. 8)。矩形パルスのTime Durationがこの遅延時間以下となる200 Hz, DR10%では発振不能になると考えられるが、Fig. 7 (b)に示した測定結果でも、この条件における出力は零となっている。

レーザー結晶における熱緩和を図りながら最大平均出力を得る目的で矩形波変調を行う場合には、発振時間波形を考慮する必要がある。

5. まとめ

光ファイバ先端発振型の波長2.8 μm 固体レーザー用結晶として、Er(30%), Cr(2%):YSGGを選定し、波長970 nmLDを励起光源に用いて発振特性を評価した。コア径が異なる石英光ファイバを用いて端面励起した結果、100 μm –200 μm コア径ファイバを用いて90 μm –140 μm の集光スポットで励起した場合に高い発振効率を得られ、連続励起による最大出力は、コア径200 μm ファイバを用いた場合で、LD励起パワー4.5 Wにおいて1.09 Wとなった。レーザー結晶に対する能動的な冷却は不要であり、光ファイバ先端部への実装形態に適するものと考えられる。

また、励起LDを矩形波変調した場合では、波長2.8 μm の発振開始タイミングの遅れにより、DR10%では繰り返し周波数200 Hz以上で発振困難となった。高い平均出力を得る場合には、発振時間波形を考慮して変調条件を設定する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) K. Rossner, M. Hummer, T. Lehnhardt, M. Muller, A. Forchel, M. Fischer, and J. Koeth: IEEE Photo. Tech. Lett. **18** (2006) 1424.
- 2) A. Henderson and R. Stafford: Opt. Express **14** (2006) 767.
- 3) Xiushan Zhu and Ravi Jain: Opt. Lett. **32** (2007) 2381.
- 4) 熊崎 護：日レ医誌 **17** (1996) 1.
- 5) 松浦 祐司, 宮城 光信：レーザー研究 **27** (1999) 173.
- 6) 大森 繁：レーザー学会第289回研究会報告レーザー医学・生物学応用, RTM-01-24 (2001) 52.
- 7) G. J. Kintz, R. Allen, and L. Esterowitz: Appl. Phys. Lett. **50** (1987) 1553.
- 8) R. C. Stoneman, J.G. Lynn, and L. Esterowitz: IEEE J. Quantum Electron. **28** (1992) 1041.
- 9) T. Jensen, A. Dening, and G. Huber: Opt. Lett. **21** (1996) 585.
- 10) Bradley J. Dinerman and Peter F. Moulton: Opt. Lett. **19** (1994) 1143.
- 11) T. Jensen, V.G. Ostroumov, and G. Huber: in *ASSL*, eds. *B. Chai and S. Payne* (OSA Proceedings Series Vol.24, OSA, Washington, 1995) IL4.