

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04929

研究課題名(和文)高出力中赤外パルスレーザーの発熱低減技術の研究

研究課題名(英文) Study on pumping schemes for heat reduction in high-energy, mid-infrared pulsed lasers

研究代表者

佐藤 篤 (Sato, Atsushi)

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号：00322686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球の風の空間分布を高精度に観測するために必要な中赤外Ho(ホルミウム)レーザーの高効率化技術を開発した。このレーザーを風観測用ライダーに用いて衛星観測を行うことにより、風向風速の高度分解能向上が期待でき、これは数値予報精度を改善し、より正確な気象予測を可能にする。研究成果として、従来方式に比べ高効率化が期待できる共振器内共鳴励起方式という新しいレーザー発振方法を提案し、30mJレベルの高出力パルス動作を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、主に風や温室効果ガスを対象とした地球環境観測に必要なレーザーの衛星搭載への実現可能性を高めることに寄与する。共振器内共鳴励起方式という独自手法による高効率化は、レーザーの消費電力を低減し、また衛星からの排熱量も削減できることから衛星搭載型レーザーセンサーの成立性を高める。本研究においてレーザーを構築しこれを実証したことは、衛星による環境観測の可能性を広げ、温暖化対策や防災対策という点で社会に貢献するものと考えらえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed the laser technology to achieve high efficiency in mid-infrared Ho (holmium) lasers required for observing the global wind profile with high precision. A space-borne wind lidar using this laser transmitter allows us to improve the altitude resolution in global wind observations. As a result, accurate numerical forecasts and weather predictions are expected. An intracavity resonant-pumping method as a new pumping scheme for Ho lasers, which is expected to be more efficient than conventional schemes, was proposed, and pulsed operations with an output energy of ~30 mJ were demonstrated.

研究分野：レーザー工学

キーワード：固体レーザー 高出力パルスレーザー ホルミウムレーザー ドップラーライダー 衛星搭載ライダー
風観測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙基本法に基づき 2017 年には衛星リモートセンシング法が施行されるなど、近年、センシング技術の宇宙利用の拡大を目指した動きが活発になってきている。観測対象としては、例えば CO₂ や CH₄ などの温室効果ガスや風のプロファイルが挙げられており、これらを地球規模で高精度に観測するには中赤外レーザを利用した衛星搭載型アクティブセンサーが必要である。これらを実現するための宇宙用レーザ光源の開発は、研究開始当初から現在に至るまで各国の研究機関により継続して進められてきた。

(2) 中赤外光源としては、固体レーザ、差周波発生(DFG)、光パラメトリック発振器(OPO)、量子カスケードレーザ(QCL)などがある。このうち、高出力動作が可能で近赤外波長領域では宇宙利用実績も豊富な固体レーザは有力な光源候補となり得るが、中赤外波長領域の高出力レーザ開発は技術的課題が多く、国内外の研究機関がその実現を目指していた。

(3) 宇宙利用を想定した場合の技術的課題の一つに、レーザから生じる熱の宇宙空間への排熱の問題があり、高出力と低発熱を両立できる中赤外レーザの開発が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究では、宇宙用レーザの中赤外波長領域の開拓と高出力化を目的とし、低発熱化のための新しい励起方式の提案とその実証を行った。レーザには、レーザ上準位寿命が長く高出力化に有利な Ho レーザを使用することとした。従来の Ho レーザには、Tm イオンを共添加することにより近赤外域の高出力半導体レーザ(LD)での励起を可能にした Tm,Ho 添加レーザや、Tm ファイバーレーザを用いて Ho レーザを励起する共鳴励起型 Ho レーザなどが用いられてきた。これに対し、本研究では、Tm レーザ共振器内で Ho 結晶を励起し、発振させる独自技術(共振器内共鳴励起方式)を導入したレーザ(図 1 参照)を提案し、この方式でのレーザ設計法の確立と動作実証を目指した。

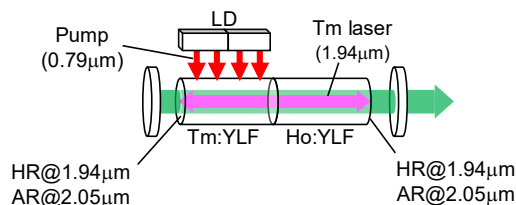


図 1 Tm レーザ共振器内励起型 Ho レーザの基本構成。

3. 研究の方法

(1) 従来方式に比べ、励起から発振までのエネルギーの受け渡しプロセスが特殊な本提案方式において、動作解析にレート方程式モデルを適用したレーザ設計法を検討した。

(2) Ho レーザの励起光源となる Tm レーザを開発し、Ho レーザ励起用高出力光源としての評価及びその最適化を実施した。Tm レーザの励起には半導体レーザを使用し、側面励起方式と端面励起方式の比較検討も行った。

(3) Tm レーザを励起光源とした共振器内共鳴励起型 Ho レーザを開発し、パルス発振の振る舞いを観測した。また、本提案方式での高出力動作の実現可能性を評価した。

4. 研究成果

(1) 図 1 に示されるレーザ構成及び図 2 に示されるエネルギー遷移過程を想定し、レート方程式モデルを利用することにより本提案方式を導入したレーザの動作解析を行った。エネルギー移譲のプロセスは、Tm 励起用 LD の光エネルギーを Tm イオンが吸収し、Tm:YLF レーザが発振するところから始まる。このとき、通常は Tm レーザ共振器を構成する出力鏡の透過率が出力結合となるが、本提案方式の場合は、Tm レーザは 2 枚の全反射鏡で構成されており、Tm レーザの出力結合は共振器内に挿入された Ho 結晶での Tm レーザ光の吸収分となる。Ho 結晶での Tm レーザ光の吸収係数には波長依存性がある。つまり、この Ho 結晶の吸収スペクトルの情報を出力結合として考慮すればよい。図 3 に 0.5%Ho:YLF 結晶の吸収スペクトルを用いて計算した Tm:YLF レーザの発振しきい値を示す。パラメータとして、Ho 結晶の長さを 2~10mm の範囲で変化させた。計算の結果、発振しきい値には Ho 結晶の吸収特性が強く反映されることが示されたが、想定される発振波長は一般的な Tm:YLF レーザと同様に 1.91~1.94μm 付近にあることがわかった。次に、レート方程式モデルを用いて計算し

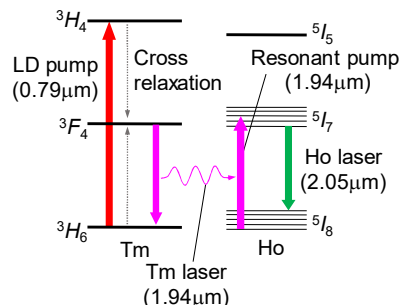


図 2 Tm レーザ共振器内励起型 Ho レーザにおけるエネルギー遷移過程。

た本提案方式における Tm:YLF レーザ及び Ho:YLF レーザのパルス波形の計算例を示す。Tm:YLF レーザはノーマル発振となるが、Ho:YLF レーザの Q スイッチは Tm:YLF レーザの発振終了後にオープンにするため、Tm:YLF レーザ出力が一定であれば緩和発振波形のバラツキは Ho:YLF レーザには影響しない。また、Tm:YLF レーザへの LD 励起エネルギーが 2J 程度あれば、100mJ 級の Q スイッチパルスが Ho:YLF レーザから得られる可能性があることが示された。

(2) レーザ設計に基づき Ho レーザの励起光源となる Tm:YLF レーザを開発した。図 5 に試作した側面励起型 Tm:YLF レーザの外観を示す。宇宙用レーザへの展開を考慮し、レーザ結晶の冷却には伝導冷却方式を採用した。レーザヘッドは、3 個の 3 段スタック型 LD により 3 方向から側面励起される構造になっている。LD 光は、石英ライトガイドを通して Tm:YLF 結晶側面からその内部に入射する。励起用 LD パルス幅 1.2ms、結晶温度 12°C、繰り返し周波数 5Hz のとき、Tm レーザにおいてスパイク状のパルス発振が確認され(図 6(a)参照)、出力エネルギー 18mJ が得られた。この Tm レーザ共振器内に Ho:YLF レーザヘッドを挿入した。Ho 結晶の挿入損失により発振しきい値が上昇したため、励起用 LD パルス幅を 2ms まで増加させた。その結果、提案する共振器内共鳴励起方式によるレーザ発振に成功した。Ho レーザは、Tm レーザパルスの後半から発振し始め、そのスパイク状パルス列の幅は 0.25ms であった。ただし、取り出せた Ho レーザ出力は、出力鏡反射率が 99%以上と高かったこともあり、微弱であった。高出力が得られなかった根本的な原因は、Tm:YLF レーザの効率が低いことにあり、これは Tm:YLF 結晶内での励起密度が設計よりもかなり低いことためであると考えられた。励起用 LD の出力にはまだ余裕があったため、LD 電源の増強により高出力化を目指すことも可能であったが、この方法では大幅な高出力化は期待できない。従って、設計方針を変更し、Tm:YLF レーザを端面励起型とすることとした。

(3) 端面励起型 Tm:YLF レーザは、図 5 に示した側面励起型 Tm:YLF レーザヘッドを流用し、レーザ発振の評価用レーザを構築することとした。図 7 に構築した端面励起型 Tm:YLF レーザを示す。励起光源には、波長 793nm、CW 出力 90W のファイバー結合型 LD を用いた。レーザ動作実験は、側面励起用 LD をオフにし、ファイバー結合型 LD による端面励起のみで実施した。図 8 に端面励起型 Tm:YLF レーザの入出力特性を示す。結晶温度 15°C、繰り返し周波数 10Hz、励起用 LD パルス幅 10ms のとき、Tm:YLF レーザ出力 215mJ を得た。側面励起時に比べスロープ効率も大幅に改善され、27%に達した。このレーザ共振器内に図 5 に示した Ho:YLF レーザヘッドを挿入し、Ho レーザ実験を行った。図 9 に端面励起型 Tm:YLF レーザを用いた共振器内共鳴励起型 Ho:YLF レーザの動作特性を示す。グラフ上段のパルス波形は、Tm レーザ及び Ho レーザ両方の出力を区別せずに測定したパルス波形であり、下段の Ho レーザのみの

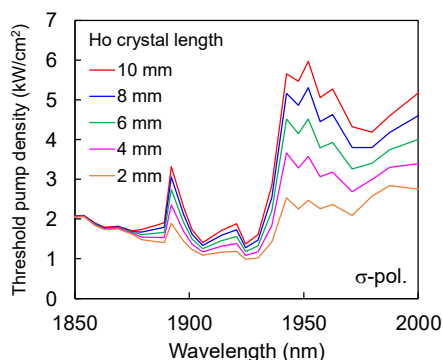


図 3 Tm:YLF レーザの発振しきい値の計算結果(σ偏光の例)。

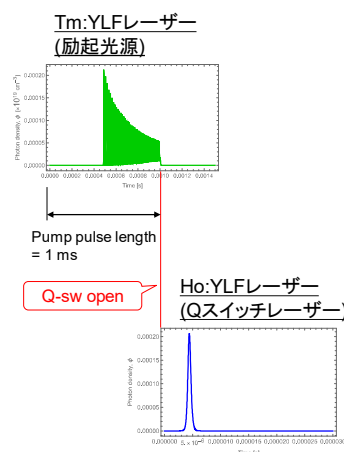


図 4 励起用 Tm:YLF レーザ及び Q スイッチ Ho:YLF レーザの動作解析結果の一例。

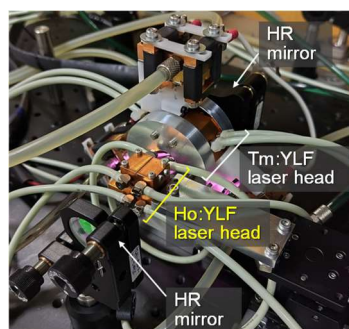


図 5 側面励起型 Tm:YLF レーザを用いた共振器内共鳴励起型 Ho:YLF レーザ。

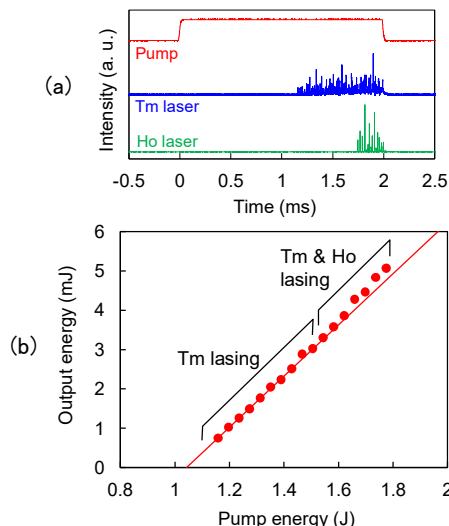


図 6 共振器内共鳴励起型 Ho:YLF レーザの動作特性。(a)パルス波形、(b)レーザ出力。

パルス波形と比較することにより、Tm レーザと Ho レーザの発振の立ち上がり時間の違いを確認することができる。励起エネルギー859mJ のとき、Tm レーザの発振開始から Ho レーザの発振開始までの時間は 2ms 以下であり、Ho レーザが低い値で動作していることが確認された。最終的に、Ho レーザの出力エネルギーとして 28mJ が得られ、Tm レーザの LD 励起入力に対する Ho レーザ出力のスロープ効率は 4.7%であった。この結果は、共振器パラメータの最適化がまだ実施されていないことを考慮すると、単独のレーザ結晶による一般的なレーザと比べて遜色ない効率で動作可能であることを示唆している。なお、Q スイッチ実験までには至らなかったが、AO Q スイッチを図 7 のレーザに導入し、レーザ発振することは確認済みであり、本研究課題終了後も Q スイッチ Ho:YLF レーザの開発を継続する。

(4) 以上に示した通り、本研究で提案した励起方式により、実用レベルでの高出力 Ho レーザの構築が可能であることを実証した。このレーザの特徴的な点として、Tm レーザ部と Ho レーザ部を分離できている点が挙げられ、これは本方式によりレーザからの発熱箇所を分散できることを示している。特に、Ho レーザ部は量子効率が 90%以上であることから、高平均出力化が期待できる。また、本研究での結果から、このレーザ技術は光増幅器への応用も可能であることがわかり、今後の予定として、MOPA(Master Oscillator and Power Amplifier)方式の高出力レーザ光源への展開を考えている。

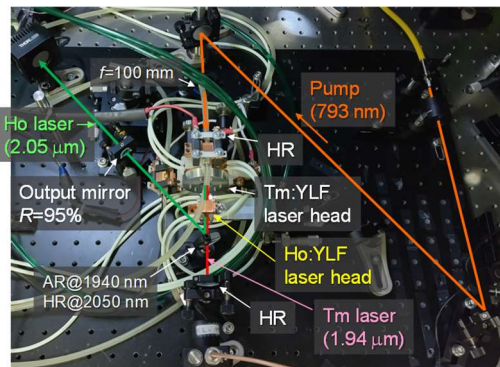


図 7 端面励起型 Tm:YLF レーザを用いた共振器内共鳴励起型 Ho:YLF レーザ。

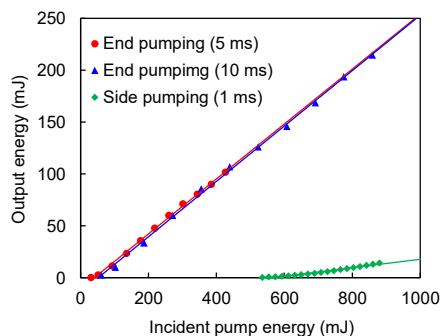


図 8 端面励起型及び側面励起型 Tm:YLF レーザの入出力特性の比較。

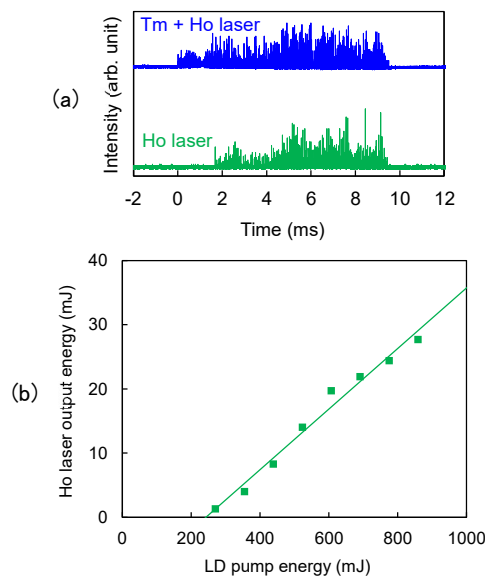


図 9 端面励起型 Tm:YLF レーザを用いた共振器内共鳴励起型 Ho:YLF レーザの動作特性。(a)パルス波形。(b)レーザ出力。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 佐藤篤	4. 巻 vol. 41
2. 論文標題 ライダーリモートセンシングのためのレーザー光源技術	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 OPTRONICS	6. 最初と最後の頁 87～90
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐藤篤	4. 巻 vol. 34
2. 論文標題 Tm、Hoドープレーザーの高効率化技術とライダー応用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 37～41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 A. Sato and S. Ishii
2. 発表標題 Development of a Ho:YLF laser intracavity pumped by an end-pumped Tm:YLF laser at room temperature
3. 学会等名 The 22nd Coherent Laser Radar Conference（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤 篤，石井昌憲
2. 発表標題 Tm:YLFレーザー共振器内励起型Ho:YLFレーザーのパルス発振特性
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤 篤, 石井昌憲
2. 発表標題 Tm:YLFレーザー共振器内励起によるHo:YLFパルスレーザーの開発
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 篤, 石井昌憲
2. 発表標題 側面励起型Tm:YLF レーザー励起Ho:YLF レーザーの開発
3. 学会等名 第41回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Ishii, K. Okamoto, H. Okamoto, T. Kimura, T. Kubota, S. Imamura, D. Sakaizawa, K. Fujihira, A. Matsumoto, I. Okabe, T. Sekiyama, T. Nishizawa, T. Takemi, Y. Miyamoto, A. Sato, R. Oki, M. Satoh, and T. Iwasaki
2. 発表標題 Future Space-Based Coherent Doppler Wind Lidar for Global Wind Profile Observation
3. 学会等名 3rd International Workshop on Space-based Lidar Remote Sensing Techniques and Emerging Technologies (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石井昌憲, 岡本幸三, 岡本 創, 木村俊義, 久保田拓志, 今村俊介, 境澤大亮, 藤平耕一, 松本紋子, 関山 剛, 西澤智明, 竹見哲也, 宮本佳明, 佐藤 篤, 沖 理子, 佐藤正樹, 岩崎俊樹
2. 発表標題 数値予報精度向上のための衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石井昌憲、岡本幸三、岡本 創、木村俊義、久保田拓志、今村俊介、境澤大亮、藤平耕一、松本紋子、関山 剛、西澤智明、竹見哲也、宮本佳明、佐藤 篤、沖 理子、佐藤正樹、岩崎 俊樹
2. 発表標題 数値予報精度向上のための衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Sato and S. Ishii
2. 発表標題 Design and development of a 2-micron pulsed Ho laser intracavity pumped by a side-pumped Tm:YLF laser
3. 学会等名 The 21st Coherent Laser Radar Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Sato and S. Ishii
2. 発表標題 Modeling and design of a resonantly pumped Q-switched Ho:YLF laser with an intracavity pumping scheme
3. 学会等名 The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 篤, 石井昌憲
2. 発表標題 波長1.9 μm帯高出力Tm:YLFパルスレーザーの開発
3. 学会等名 第40回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 篤, 石井昌憲
2. 発表標題 共鳴励起型Ho:YLF レーザーにおける共振器内励起方式の検討
3. 学会等名 第39回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 篤, 石井昌憲
2. 発表標題 共振器内共鳴励起方式によるQスイッチHoレーザーの 高効率化の検討
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石井 昌憲 (Ishii Shoken) (70359107)	東京都立大学・システムデザイン研究科・教授 (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------