

## 2 $\mu$ m コヒーレント・ドップラー・ライダーのための 最適レーザ・ホスト結晶の検討

Studies on an optimum laser host crystal for 2- $\mu$ m coherent Doppler lidars

佐藤 篤, 浅井和弘, 水谷耕平\*, 板部敏和\*

Atsushi Sato, Kazuhiro Asai, Kohei Mizutani\*, and Toshikazu Itabe\*

東北工業大学, \*通信総合研究所

Tohoku Institute of Technology, \*Communications Research Laboratory

### Abstract

We report on lasing characteristics of various Tm,Ho-codoped laser crystals for 2- $\mu$ m coherent Doppler lidar transmitters. The laser experiments were performed for different host materials (YLiF<sub>4</sub>, LuAG, LuLiF<sub>4</sub>, and GdVO<sub>4</sub>) under the same condition. In comparison, a maximum output energy of 27 mJ was obtained using a Tm,Ho:LuLiF<sub>4</sub> crystal. Furthermore, laser performance of Tm,Ho:GdVO<sub>4</sub> with lower dopant concentrations was comparable to Tm,Ho:LuLiF<sub>4</sub>.

### 1. はじめに

Tm,Hoドープ結晶を用いた波長2 $\mu$ m帯固体レーザは、アイセイフ(eye-safe)領域で発振することに加え、適度な誘導放出断面積と長いレーザ上準位寿命を有することから、発振スペクトル線幅の狭い単一縦モード Q スイッチ・レーザが必要とされるコヒーレント・ドップラー・ライダーの送信光源として適している。代表的な2 $\mu$ mレーザ結晶としては、Tm:YAG、Tm,Ho:YAG、Tm,Ho:YLiF<sub>4</sub>などが挙げられるが、Tm:YAGは利得が低く、またTm,Ho:YAGはアップコンバージョンによるエネルギー蓄積効率の低下が起こることなどから、利得が高くかつアップコンバージョンが起こりにくい Tm,Ho:YLiF<sub>4</sub>が高出力パルス発振に最適な結晶であることがわかってきた<sup>1-3)</sup>。一方、近年の結晶育成技術の進展により、従来では高品質に育成することが困難であった新しいレーザ結晶が入手できるようになった<sup>4)</sup>。これらのレーザ結晶の中でも、YをLuに置換したLuAGやLuLiF<sub>4</sub>はYAGやYLiF<sub>4</sub>より高効率に発振することが報告されている<sup>5-8)</sup>。このほか、Nd:YAGレーザ用の半導体レーザ(LD)で励起が可能なTm,Ho:YVO<sub>4</sub>においてYをGdに置換したTm,Ho:GdVO<sub>4</sub>もまた、励起波長領域における優れた吸収特性とYAGに匹敵する高い熱伝導率を有することから新しい2 $\mu$ mレーザ結晶として有望視されている<sup>9-11)</sup>。しかしながら、目下のところ、これらの2 $\mu$ mレーザ結晶を用いたレーザ発振はほとんど報告されていないため、最適なホスト結晶が何であるかを結論付けることは困難である。そこで、本研究では全く同じ励起条件ならびに共振器構成の下でこれらの2 $\mu$ mレーザ結晶の動作比較実験を行ったので報告する。

### 2. 吸収特性

ドープ・イオンの一つであるTmイオンの吸収スペクトルのピークは波長800nm付近に存在するため、2 $\mu$ mレーザ結晶はAlGaAs系の高出力LDにより励起が可能である。Fig.1は、異なるホスト材料を用いたTm,Hoドープ結晶の波長800nm付近における吸収スペクトルの測定結果を示す。測定に使用した結晶サンプルのTmイオン及びHoイオンのドープ率は、それぞれ5 at.%及び0.5 at.%である。Tm,Ho:LuAGの吸収スペクトル形状は、Tm,Ho:YAGに似ているがスペクトルのピーク波長が2~3nm程度長波長側にシフトしていた。励起波長となる783nm及び788nmでの吸収係数は、3~4cm<sup>-1</sup>であった。Tm,Ho:LuLiF<sub>4</sub>はTm,Ho:YLiF<sub>4</sub>と同様に波長792nm付近で3cm<sup>-1</sup>程度の吸収係数を有しており、またE//c偏光を利用できる場合には高い吸収係数(5cm<sup>-1</sup>)を示す波長780nmでの励起が可能である。しかしながら、市販されている高出力LDの発振波長領域の下限は一般に792nm程度であるので、必要な性能を有するTm,Ho:LuAG及びTm,Ho:LuLiF<sub>4</sub>励起用LDの入手は比較的困難であり、特注品を使用せざるを得ない場合が多いのが現状である。これらの結晶に対し、ホスト結晶をGdVO<sub>4</sub>に変えることにより、Tmイオンの吸収スペクトルのピークは波長800nm付近にシフトし、さらに吸収係数はLuAG、LuLiF<sub>4</sub>に比べ3~4倍高くなることがわかった。E//c偏光( $\pi$ 偏光)及びE $\perp$ c偏光( $\sigma$ 偏光)における吸収スペクトルのピーク波長はそれぞれ798nm及び797nmであり、各ピーク波長での吸収係数はそれぞれ14cm<sup>-1</sup>及び11cm<sup>-1</sup>であった。Tm,Ho:GdVO<sub>4</sub>の吸収スペクトル幅は非常に広く、波長805nmでも8cm<sup>-1</sup>以上( $\sigma$ 偏光)の吸収係数が得られる。このことは、

比較的入手が容易な Nd:YAG レーザ励起用の LD がそのまま  $2\mu\text{m}$  レーザ励起用として使用でき、かつ高い励起効率が得られることを意味している。従って、実用的な面も含め励起効率に関しては Tm,Ho:GdVO<sub>4</sub> が最も有利である。

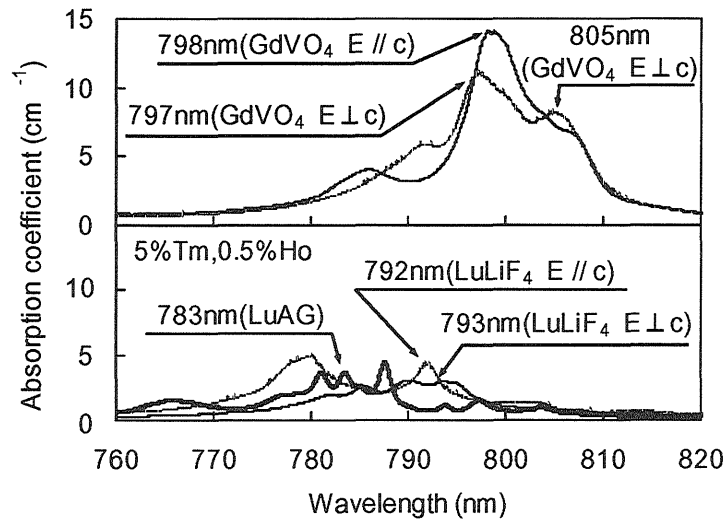


Fig.1 Absorption spectra of 5%Tm,0.5%Ho:LuLiF<sub>4</sub>, 5%Tm,0.5%Ho:LuAG, and 5%Tm,0.5%Ho:GdVO<sub>4</sub>.

### 3. 共振器構成

Fig.2 は、擬似エンドポンプ方式を用いた共振器構成を示す。この励起方式は、高出力化に有利なサイドポンプ構成でありながら、吸収係数の低い  $2\mu\text{m}$  レーザ結晶においても高効率励起が可能な新しい励起方法である<sup>7,8)</sup>。レンズダクトにより集光された LD 光はレーザ結晶側面から結晶内へ入射した後、結晶のブリュスター面で反射し、その結果レーザ結晶内が均一に励起される。このとき、通常のサイドポンプ方式に比べ結晶内での励起光の伝搬距離が長くとれるため、準 3 準位レーザにおける再吸収損失を増大させることなく高い励起光吸収率が得られる。

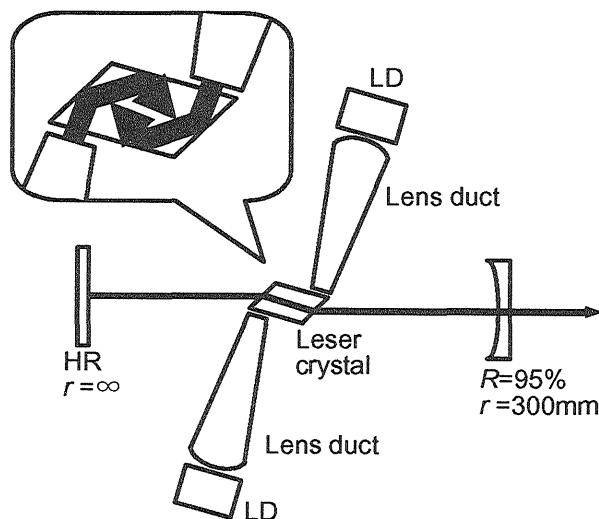


Fig.2 Resonator configuration with a quasi-end-pumping technique.

レーザ結晶はすべての面が光学研磨されており、コーティングは一切施されていない。結晶サイズは 3mm(W)×2.7mm(L)×4mm(H)であり、冷却は銅製のヒートシンクを用い結晶の上下 2 面から伝導冷却方式により行った。レーザ共振器は、平面全反射鏡及び曲率半径 300mm、反射率 95%の凹面出力鏡からなり、共振器長は 150mm とした。励起用 LD は 6 段スタック型の浜松ホトニクス社製 LD であり、パルス幅 750 $\mu$ s で QCW 動作させた。Tm,Ho:LuAG は中心波長を 783nm に温度同調させた LD を用いて励起し、Tm,Ho:YLiF<sub>4</sub>、Tm,Ho:LuLiF<sub>4</sub> 及び Tm,Ho:GdVO<sub>4</sub> は全く同じ仕様の別の LD を波長 792nm に温度同調して励起を行った。

#### 4. 実験結果

結晶冷却温度 20°C、繰り返し周波数 5Hz におけるノーマル発振特性の比較結果を Fig.3 及び Table 1 に示す。横軸は結晶へ入射する励起エネルギーを表し、縦軸は 2 $\mu$ m レーザ出力を示している。光線追跡シミュレーションの結果、入射励起エネルギーのうち結晶内で吸収される励起エネルギーはいずれの結晶でも 60%以上であることがわかった。使用した YLiF<sub>4</sub>、LuLiF<sub>4</sub>、LuAG 結晶の Tm,Ho ドープ率はそれぞれ 5 at.%及び 0.5 at.%であるが、同じドープ率の GdVO<sub>4</sub> では他の結晶に比べ再吸収損失が大きいためレーザ発振が得られなかった。そこで、予備実験としてドープ率の最適化を行い、レーザ動作実験では Tm: 3 at.%、Ho: 0.3 at.%の GdVO<sub>4</sub> 結晶を用いた。

比較実験の結果、従来より高効率動作が報告されている Tm,Ho:YLiF<sub>4</sub> に対し、Tm,Ho:LuAG、Tm,Ho:LuLiF<sub>4</sub>、Tm,Ho:GdVO<sub>4</sub> のいずれの結晶もそれを上回る動作特性が達成された。Tm,Ho:LuAG 及び Tm,Ho:GdVO<sub>4</sub> は発振しきい値はやや高いがスロープ効率が高いため、特に励起エネルギーが高い領域で Tm,Ho:YLiF<sub>4</sub> よりも高出力が得られた。Tm,Ho:LuLiF<sub>4</sub> は発振しきい値が低かつスロープ効率も高いため 4 つの結晶のうち最も高効率な発振が可能であることがわかった。Tm,Ho:LuLiF<sub>4</sub> を用いたとき、最大出力エネルギー 27mJ、スロープ効率 12.6%が得られ、今回の実験では結晶に入射した励起エネルギーのうち 60%程度しか使用していないことを考慮すると、励起光学系の最適化により最大で約 20%のスロープ効率が期待できる。また、Tm,Ho:GdVO<sub>4</sub> は、Tm,Ho:LuLiF<sub>4</sub> よりも若干出力が低かったものの、励起波長を 800~805nm に変えることによりさらに高出力化が可能である。従って、励起用 LD として Nd:YAG 用の 805nm の LD が使用できることも考慮すると、実用性及び性能の両方の面で最適な 2 $\mu$ m レーザ結晶となり得ることが明らかである。

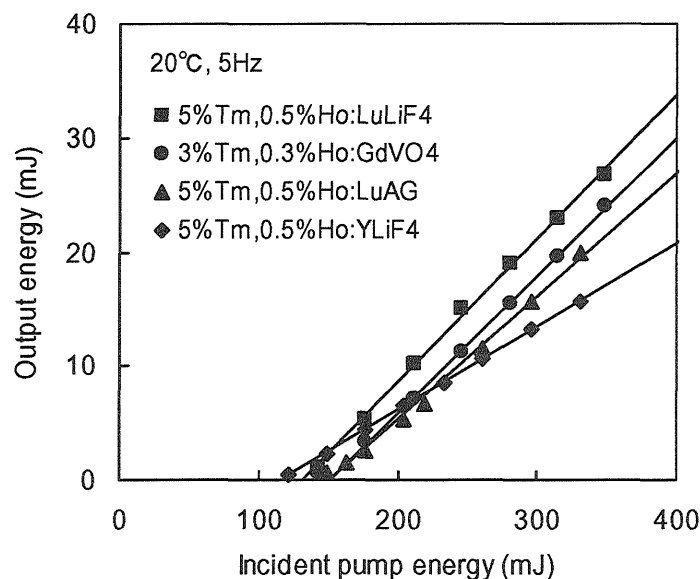


Fig.3 Output energy as a function of incident pump energy.

Table 1 Comparison of lasing characteristics for various host crystals.

	YLiF <sub>4</sub> 5%Tm, 0.5%Ho	LuAG 5%Tm, 0.5%Ho	GdVO <sub>4</sub> 3%Tm, 0.3%Ho	LuLiF <sub>4</sub> 5%Tm, 0.5%Ho
Threshold energy	116 mJ	151 mJ	151 mJ	132 mJ
Slope efficiency	7.3%	10.8%	12.1%	12.6%
Output energy	15.7 mJ	20.0 mJ	24.1 mJ	26.8 mJ

## 5. おわりに

本研究では、2 $\mu$ m コヒーレント・ドップラー・ライダー用の最適なレーザ結晶を見出すため新しいホスト結晶を用いた Tm,Ho ドープ結晶に対するレーザ動作特性の比較実験を行った。その結果、Tm,Ho:LuLiF<sub>4</sub>において最大出力 27mJ が得られ、また励起波長において優れた吸収特性を示す Tm,Ho:GdVO<sub>4</sub>においてもそれと同等の高出力かつ高効率動作が可能であることを示した。

## 参考文献

- 1) M. G. Jani, N. P. Barnes, K. E. Murray, D. W. Hart, G. J. Quarles, and V. K. Castillo, *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 112-115 (1997).
- 2) J. Yu, U. N. Singh, N. P. Barnes, and M. Petros, *Opt. Lett.* **23**, 780-782 (1998).
- 3) G. J. Koch, M. Petros, J. Yu, and U. N. Singh, *Appl. Opt.* **41**, 1718-1721 (2002).
- 4) A. Bensalah, K. Shimamura, V. Sudesh, H. Sato, K. Ito, and T. Fukuda, *J. Crystal Growth*, **223**, 539-544 (2001).
- 5) N. P. Barnes, E. D. Filer, F. L. Naranjo, W. J. Rodriguez, and M. R. Kokta, *Opt. Lett.* **18**, 708-710 (1993).
- 6) N. P. Barnes, M. G. Jani, and R. L. Hutcheson, *Appl. Opt.* **34**, 4290-4294 (1995).
- 7) V. Sudesh, K. Asai, K. Shimamura, and T. Fukuda, *Opt. Lett.* **26**, 1675-1677 (2001).
- 8) V. Sudesh, K. Asai, K. Shimamura, and T. Fukuda, *IEEE J. Quantum Electron.* **38**, 1102-1109 (2002).
- 9) P. J. Morris, W. Luthy, H. P. Weber, Y. D. Zavartsev, P. A. Studenikin, I. Shcherbakov, and A. I. Zagumenyi, *Opt. Commun.* **111**, 493-496 (1994).
- 10) A. Sato and K. Asai, *18th Topical Meeting on Advanced Solid-State Photonics (ASSP 2003)* (San Antonio, Texas, USA, Feb. 2-5, 2003), paper WB4, p.269.
- 11) 佐藤 篤, 浅井和弘, 町田 博, 和田智之, 水谷耕平, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 27p-YR-1, p.1149 (2003).