

450 nm 半導体レーザー励起チタンドープサファイアレーザーの低温動作による性能改善

Ti:sapphire laser pumped by 450-nm diode laser at low temperature

塩谷 優太 (B4)

Yuta Shioya

Abstract

We examined output performance of continuous wave Ti:sapphire laser pumped by a 450-nm LD at cryogenic temperatures. We also investigated the temperature dependence of pump laser absorption and the pumping efficiency.

1. はじめに

チタンサファイア(Ti:Al₂O₃ Ti:sapphire)結晶は、650 nm~1100 nm という幅広い利得帯域と優れた熱耐性を兼ね備えており、安定してフェムト秒パルスを生成できることから、超高速レーザー研究に幅広く使用されている光源である。従来は、励起光源としてNdレーザーや光励起半導体レーザーの第二高調波を用いていた。しかし、これらの光源は大型かつ高価であるという問題点がある。それに対し、近年では~450 nmの波長帯で発振する安価で小型なInGaN系半導体レーザー(LD)の高出力化が進み(~5 W)、Ti:sapphireレーザーの直接励起が可能になった。現在、最高出力のInGaN系LDは~450 nmで動作する。しかし、この波長帯でTi:sapphireを励起した場合、残留吸収[1]と励起誘起損失[2,3]という望ましくない現象が観測される。残留吸収とは、300 nm~500nm帯に存在する吸収のことで、残留吸収に吸収された励起光は発振に寄与しないため、効率が落ちる。また、残留吸収はドーブ濃度と共に増加することが明らかとなっている。また、450 nmで励起した場合、発振波長(~800 nm)に対して吸収損失が増加し、出力が落ちる現象が確認されている。これを励起誘起損失と呼ぶ。励起誘起損失はTi³⁺とTi⁴⁺の間の電荷遷移の結果生じたTi³⁺-Ti⁴⁺ペアが~800 nmに吸収を持つことが原因と考えられている。今回、我々はドーブ濃

度の異なる3つの結晶を用いて実験を行い、特性を比較した。また、励起誘起損失がESAとその結果起きる電荷遷移の結果であるという仮説を立て、ESAの存在を確認した。また蛍光量の温度依存性を測定し、青色LD励起Ti:sapphireレーザーが極低温下で性能が改善する可能性を探った。

2. Ti:sapphire レーザ室温連続波発振実験

まず我々は Fig. 1 に示す実験セットアップを用い、Ti:sapphire レーザ室温連続波発振実験を行った。

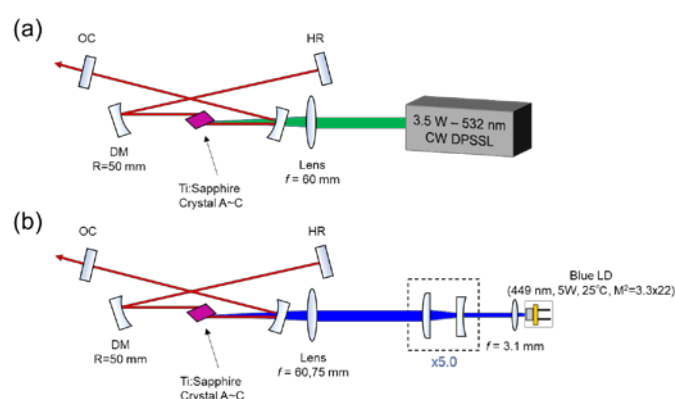


Fig. 1 Experimental setup of CW Ti:sapphire laser. (a) 532 nm pump. (b) 449 nm pump.

励起光源として、出力~3.5WのNd:YAGレーザーのSHG波と、~5Wの青色LDを用いた。使用したTi:sapphire結晶はTable 1にまとめた3つであり、用いたOutput Couplerは2.1%、3.4%、4.7%、6.3%の4つである。

Table 1 Summary of characteristics of Ti:sapphire crystals.

	Crystal A	Crystal B	Crystal C
Abs. coef. (/cm)	3.83	4.45	6.46
Length (mm)	10	2.5	4.5
FOM	250	200	150

得られた出力特性を Fig. 1 に示し, Findlay-Clay 法で求めた損失とモードマッチング効率を加えた更に詳細な結果が Table 2 である.

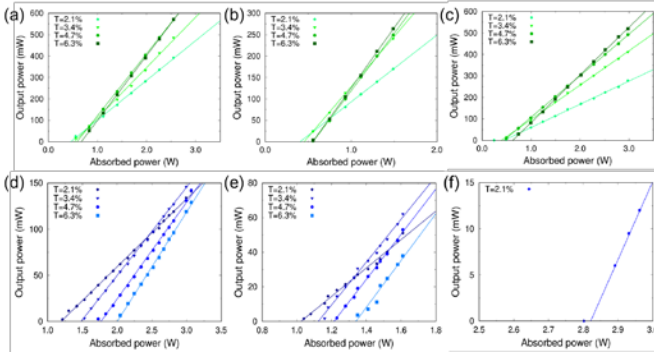


Fig. 2 Output performance (room temperature). (a,b,c) 532-nm pumping. (d,e,f) 450-nm pumping. (a,d) Crystal A. (b,e) Crystal B. (c,f) crystal C.

Table 2 Output Characteristic

	Crystal A		Crystal B		Crystal C		
	450 nm	532 nm	450 nm	532 nm	450 nm	532 nm	
Slope	2.1%	7.4	18.5	8.2	15.6	8.5	10.8
efficiency	3.4%	9.6	23.5	12.4	23.4	-	16
(%)	4.7%	10.5	28.9	13	26.7	-	19.4
	6.3%	11.9	30.2	13.5	28	-	22.2
Mode matching efficiency (%)	60	90	67	93	65	93	
Loss(cm ⁻¹)	0.022	0.038	0.26	0.128	-	0.011	

三つの結晶で, 青色励起, 緑色励起の両方で発振が得られた. 青色励起時の最高出力は Crystal A,B,C でそれぞれ 158 mW, 62 mW, 12 mW であった. また青色励起時の損失はドープ濃度が最も低い Crystal A で 0.022 cm⁻¹ と最も小さくすることができた.

Crystal A は他の二つの結晶に比べて長尺なため, モードマッチング効率が低いにもかかわらず, ドープ濃度を下げることによって残留吸収を小さくし, スロープ効率を上げることが出来た.

3. 励起誘起損失

次に, Fig. 2 のような Ti³⁺ と Ti⁴⁺ のエネルギーバンド図を用いて励起誘起損失の仮説を立てた. 先行研究[4]では, 270 nm の光で Ti:sapphire を励起した際に 800 nm の蛍光があり, これは束縛励起子

(Exciton)の準位に励起され, その後レーザ上準位に遷移した成分の Ti³⁺(k₂)が発光に寄与していると説明している. またこのとき, 束縛励起子の準位にある Ti³⁺が電荷遷移を起こし, Ti⁴⁺になる成分(k₁)があると述べている. 我々はこの先行研究から, 450 nm 励起の場合にも ESA によってレーザ上準位から束縛励起子の準位に励起される成分があり, またそこから電荷遷移を起こして Ti⁴⁺になる成分があると考えた. この Ti⁴⁺が Ti³⁺とペアになり 800 nm 帯の光を吸収する.

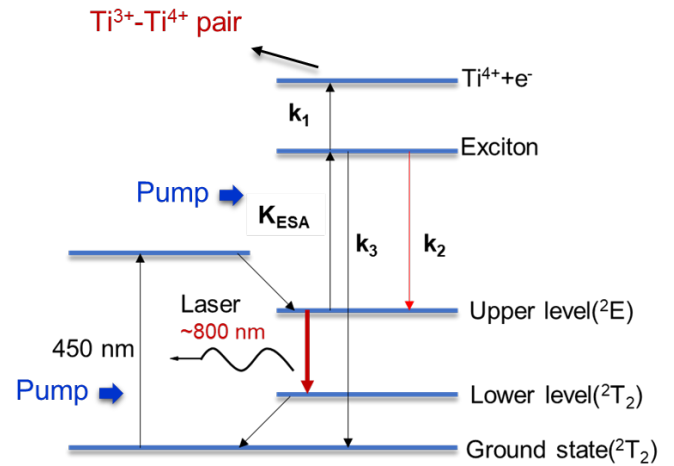


Fig. 3 A schematic of energy diagram of Ti³⁺ and Ti⁴⁺.

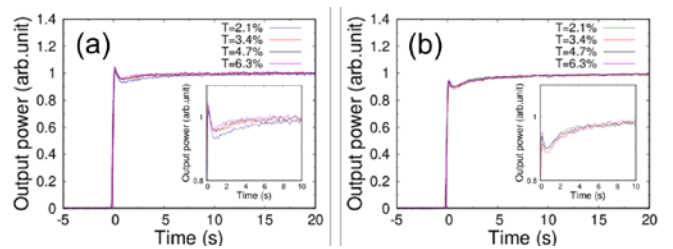


Fig. 4 Recovery of the output power of Ti:sapphire laser pumped after inhibiting lasing for a certain period of time as a parameter of output mirror transmission. (a) 449-nm LD pumping, and (b) 532-nm DPSSL-SHG pumping.

そこで, まず ESA の存在を直接確認すべく, Fig. 1 と同じセットアップで実験を行った. 共振器内で発振を一定時間遮り, その後発振を再開させたときの出力の回復の様子を観測した. ただし, この OFF-

ONスイッチは十分にゆっくりしているのでQスイッチ動作にはならない。得られた回復の様子は Fig. 3 のようになった。

450 nm 励起の場合、出力が戻りきるまでに 10 秒程度の時間がかかった。これは、ESA によりレーザ上準位より上の準位に励起された成分がレーザ上準位まで戻ってくるのに時間がかかるためと考えられる。また、出力が回復するまでの時間に OC 透過率依存性が見られ、OC 透過率が高いほど回復時間が短かった。これは、発振が妨げられているとき (-5~0 s) はレーザ上準位密度が極めて高く、それに対して OC 透過率が大きいほど定常状態の上準位密度が高いため、OC 透過率が高いほど発振が妨げられているときと発振が再開したときの差が小さいため、回復が小さいと考えられる。また 532 nm 励起時にも出力の回復が見られ、ESA が存在することが分かった。しかし 532 nm 励起時には OC 透過率による回復の差は見られなかった。更に比較として、共振器内で発振を妨げるのではなく、励起光自体を遮ったときの出力の回復と、450 nm 励起時に ESA の無い Pr:YLF で同じように共振器内で発振を遮ったときの出力の回復を Fig. 5 に示す。これらの場合には、Fig. 4 のような回復は見られず、このことから Fig. 4 の回復は ESA を反映していると考えられる。

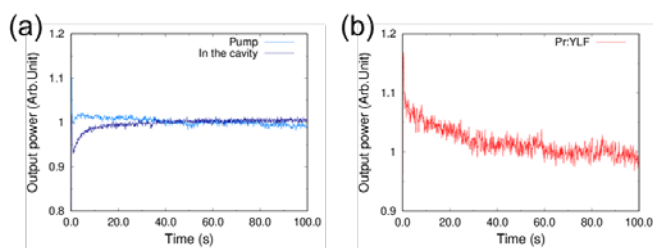


Fig. 5 Comparison of the output power recovery, when the pump beam is interrupted and when the oscillation is interrupted in the cavity (a). Output power recovery of Pr:YLF laser pumped by 450-nm LD when the oscillation is interrupted in the cavity (b).

4. 極低温動作

さらに、極低温にすることで励起誘起損失や残留吸収が改善するのではないかと考え、Fig. 6 に示すセットアップで蛍光量の温度依存性を取得した。励起光源は 449 nm LD と 532 nm DPSSL の二つで実験を行った。

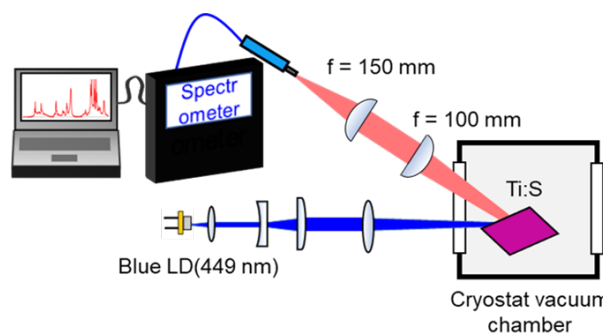


Fig. 6 Experimental setup for measurement of fluorescence intensity.

得られた蛍光量の温度依存性は Fig. 6 に示す通りである。このとき蛍光量は吸収パワーで割って吸収パワー一定としている。低温にしたときの蛍光量の改善は、緑色励起時より青色励起時の方が大きく、またドープ濃度が高く FOM が低い結晶で顕著であった。緑色励起時は結晶による差はほとんど見られなかった。これは、青色励起時にのみ存在する残留吸収が低温になって軽減された可能性を示す。

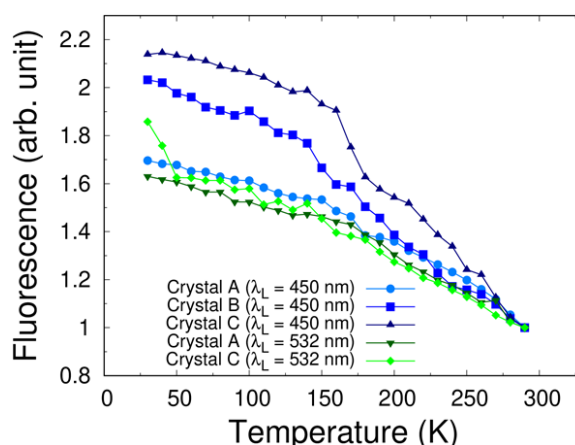


Fig. 1 Temperature dependence of improvement in fluorescence yield

5. まとめ

今回、我々は Ti:sapphire を 450 nm で励起すると重大な損失を生じることを再確認した。しかし、残留吸収に関しては低ドープ濃度で高 FOM の結晶を用いることで軽減できる。更に、極低温にすることで蛍光量は大きな改善を見せた。これらの結果から、低ドープ結晶を用い、極低温にすることで 450 nm 励起 Ti:sapphire レーザの出力を改善できる可能性があることを見出した。

References

- [1] P. F. Moulton, J. G. Cederberg, K. T. Stevens, G. Foundos, M. Koselja, and J. Preclikova. "Optimized InGaN-diode pumping of Ti:sapphire crystal," *Optical Materials Express*, Vol. 9, No. 5, 2131-2146 (2019).
- [2] P. W. Roth, A. J. Maclean, D. Burns, and A. J. Kemp, "Directly diode-laser-pumped Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.* 34(21), 3334-3336 (2009).
- [3] R. Sawada, H. Tanaka H, N. Sugiyama, and F. Kannari, "Wavelength-multiplexed pumping with 478- and 520-nm indium gallium nitride laser diodes for Ti:sapphire laser," *Appl. Opt.* 56(6), 1654-1661 (2017).
- [4] W. C. Wong, D. S. McClure, S. A. Basun, M. R. Kokta, "Charge-exchange processes in titanium-doped sapphire crystals. I. Charge-exchange energies and titanium-bound excitons," *Phys. Rev. B* 51, 5682-5692(1995).