

# 青色半導体レーザーを用いた高密度励起 連続波 Ti:sapphire レーザーの効率に関する理論解析

片岡俊二<sup>†</sup>, 柴田正志<sup>††</sup>, 小林亮<sup>†</sup>, 青柳祐宇<sup>††</sup>, 前田準哉<sup>††</sup>, 川戸栄<sup>†††</sup>, 河仲準二<sup>††††</sup>

<sup>†</sup>福井大学大学院工学研究科気電子工学専攻, <sup>††</sup>福井大学大学院工学部電気電子工学科, <sup>†††</sup>

<sup>††††</sup>福井大学学術研究院工学系部門, <sup>†††††</sup>レーザー科学研究所

はじめに

Ti:sapphire レーザーは超短パルスレーザーの代表ともいえるレーザーである。超短パルスレーザーは様々な分野への応用が期待されているが、励起光源が固体レーザーであるため、レーザー装置が複雑かつ大型で高価という課題がある。近年、GaN 系半導体レーザーの長波長化が可能となり、半導体レーザー励起 Ti:sapphire レーザーの研究も盛んに行われるようになってきている。

現在報告されている青色半導体レーザー励起連続波 Ti:sapphire レーザーの光-光変換効率は 8.98% [1]、これに対し緑色半導体レーザー励起の場合は 21.6% [2] が報告されている。青色半導体レーザーと比較して、緑色半導体レーザーは結晶への吸収効率がいため光-光変換効率が高いが、出力が数倍低く価格も 1 桁以上高い。このため、半導体レーザー励起連続波 Ti:sapphire レーザーにおいて、安価で高出力な青色半導体レーザーを用いて高効率化を目指すのが相応しいと考えた。そこで、本研究では高密度励起による高利得化を用いて、青色半導体レーザーを用いた連続波 Ti:sapphire レーザーの高効率化に関する理論解析を行った。

## 光-光変換効率

まず、レーザーの光-光変換効率 $\eta_{oo}$ は、

$$\eta_{oo} = \frac{P_{out}}{P_p} = \eta_a \eta_p \eta_q \eta_c \frac{S}{F} \quad (1)$$

で与えられる。式(1)は、励起光パワー $P_p$ に対しどれだけ出力光パワー $P_{out}$ を取り出せるかの割合である。表 1 に式で用いた記号を示す。

表 1 式で用いた記号

$\eta_{oo}$	光-光変換効率	$h$	プランク定数
$P_{out}$	出力光パワー	$v_L$	レーザー光周波数
$P_p$	励起光パワー	$V_L$	レーザー光モード体積
$\eta_a$	励起光吸収効率	$l$	結晶長
$\eta_p$	励起量子効率	$f$	レーザー上準位のボルツマン分布の和
$\eta_q$	原子量子効率	$r_{(x,y,z)}$	励起光空間分布関数
$\eta_c$	結合効率	$\Phi_{0(x,y,z)}$	レーザー光空間分布関数
$S$	レーザー光子指数	$T_{oc}$	出力鏡透過率
$F$	励起光子指数	$L_i$	共振器内部損失
$S/F$	励起光とレーザー光の重なり具合	$\eta_s$	スロープ効率
$\sigma_{eff}$	誘導放出断面積	$P_{th}$	発振閾値
$\tau_f$	蛍光寿命	$V_{eff}$	励起光とレーザー光のモード体積
$P_L$	レーザー光パワー		

$S$ はレーザー光子指数,  $F$ は励起光子指数を拡張したものであり,  $S/F$ は励起光とレーザー光の重なり具合を表し、次の式で表される[3]。

$$S = \frac{2\sigma_e \tau_f P_L}{h\nu_L V_L / l} \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{\int_0^1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f r_p(x,y,z) V_L \Phi_0(x,y,z)}{1 + f S V_L \Phi_0(x,y,z)} dx dy dz} \quad (3)$$

式(1)において、結合効率 $\eta_c$ は次の式で表される。

$$\eta_c = \frac{T_{oc}}{T_{oc} + L_i} \quad (4)$$

$T_{oc}$ は出力鏡透過率,  $L_i$ は共振器内部損失である。結合効率 $\eta_c$ は共振器内の損失に対する出力鏡透過率 $T_{oc}$ の最適化が必要である。また、出力光パワー $P_{out}$ は次の式で近似できる。

$$P_{out} \sim \eta_s (P_p - P_{th}) \quad (5)$$

$\eta_s$ はレーザー光のスロープ効率,  $P_{th}$ は発振閾値である。光-光変換効率 $\eta_{oo}$ を向上させるためには、レーザー光のスロープ効率 $\eta_s$ を上げ、発振閾値 $P_{th}$ を下げるのが望ましい。しかし、発振閾値 $P_{th}$ は励起光とレーザー光のモード体積 $V_{eff}$ に比例する。発振閾値 $P_{th}$ を下げるためにモード体積 $V_{eff}$ を小さくすると、励起光とレーザー光の重なり具合 $S/F$ が悪くなり、光-光変換効率 $\eta_{oo}$ が低下する。このため、光-光変換効率 $\eta_{oo}$ の向上には、モード体積 $V_{eff}$ と出力鏡透過率 $T_{oc}$ を最適な条件にすることが必要である。

## 解析条件

青色半導体レーザーを用いた高密度励起連続波 Ti:sapphire レーザーの高効率化を行うために、出力 3.5 W の青色半導体レーザーを用い、励起光のモード体積を最小とすることで集光強度 $I_p$ を高め解析を行う。また、励起光源である青色半導体レーザーは、ビーム品質 $M^2$ が悪く非点収差があるため、解析ではビーム径及びビーム品質が垂直、水平方向で異なる楕円モデルを用いた。

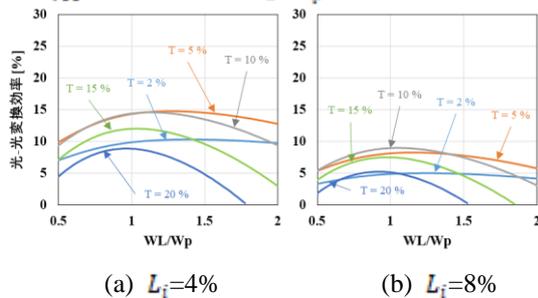
まず、励起光のビーム品質 $M^2$ は、出力 3.5 W の青色半導体レーザーの実測値より、垂直方向 1.39、水平方向 13.5 とした。また、励起光波長は実測値より 448 nm とした。発振閾値 $P_{th}$ を低減させ、かつ集光強度 $I_p$ を高めるため、結晶内で励起光のモード体積が最小となるように励起光のスポット半径を垂直

方向  $14\ \mu\text{m}$ , 水平方向  $43\ \mu\text{m}$  とした。レーザー結晶として、イオンドープ濃度  $0.25\ \text{wt.}\%$ ,  $\text{FOM}=200$  のブリュースターカットされた  $5\ \text{mm}$  角の  $\text{Ti:sapphire}$  結晶で解析を行った。励起光吸収効率  $\eta_a$  は実測値より  $78.5\%$  とし、誘導放出断面積  $\sigma_{eff}$  は  $30 \times 10^{-20}\ \text{cm}^2$ , 蛍光寿命  $\tau_f$  は  $3.2\ \mu\text{s}$ , 励起量子効率  $\eta_p$  は  $100\%$ , レーザー光波長  $\nu_L$  は  $765\ \text{nm}$  とした。

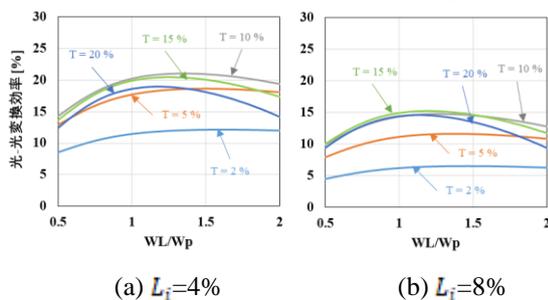
次に、共振器内部損失  $L_i$  は実験結果で得られた入出力特性の発振閾値  $P_{th}$  から見積もった値を用いた。発振閾値付近では出力鏡透過率  $T_{oc}$  の変化に対してモード体積が変わらないと仮定し、得られた発振閾値と出力鏡透過率の関係から共振器内部損失を見積もった。比較した結果、共振器内部損失は  $4\sim 10\%$  の間と見積もれた。よって、共振器内部損失  $L_i$  を  $4\%$ ,  $6\%$ ,  $8\%$ ,  $10\%$  と変化させ比較を行う。また、高密度励起として青色半導体レーザー1つ当たりの集光強度を  $I_p=200\ \text{[kW/cm}^2]$  とし、集光強度  $I_p$  を  $200, 400, 800\ \text{[kW/cm}^2]$  と変化させ、同様に比較を行う。さらに、高効率化のためには、出力鏡透過率を最適な条件にすることも必要であるため。出力鏡透過率  $T_{oc}$  を  $2, 5, 10, 15, 20\%$  と変化させ、同様に比較を行う。

## 解析結果

結晶内の励起光ビーム半径  $W_p$  とレーザー光ビーム半径  $W_L$  の比  $W_L/W_p$  を光軸方向で分布させることで、光-光変換効率  $\eta_{oo}$  はビーム径比  $W_L/W_p$  の関数となる。図 2, 3 に、集光強度  $I_p$  及び共振器内部損失  $L_i$  を変化させた時の、出力鏡透過率  $T_{oc}$  ごとの光-光変換効率  $\eta_{oo}$  をビーム径比  $W_L/W_p$  の関数として示す。



(a)  $L_i=4\%$  (b)  $L_i=8\%$   
図 2 集光強度  $I_p=200\ \text{[kW/cm}^2]$  の場合のビーム径比に対する光-光変換効率



(a)  $L_i=4\%$  (b)  $L_i=8\%$   
図 3 集光強度  $I_p=400\ \text{[kW/cm}^2]$  の場合のビーム径比に対する光-光変換効率

図 2(a)は集光強度  $I_p=200\ \text{[kW/cm}^2]$ , 共振器内部損失  $L_i=4\%$  の場合のビーム径比に対する光-光変換効率であり、図 2(b)は集光強度  $I_p=200\ \text{[kW/cm}^2]$ , 共振器内部損失  $L_i=8\%$  の場合のビーム径比に対する光-光変換効率である。同様に、図 3(a), 3(b)は集光強

度  $I_p=400\ \text{[kW/cm}^2]$ , 共振器内部損失  $L_i=4\%$ ,  $L_i=8\%$  の場合のビーム径比に対する光-光変換効率である。

励起光の集光強度  $I_p=200\ \text{[kW/cm}^2]$  の場合、共振器内部損失  $L_i=4\%$ , 出力鏡透過率  $T_{oc}=5\%$  のとき、光-光変換効率が  $14.5\%$  である。これに対して、集光強度  $I_p=400\ \text{[kW/cm}^2]$  の場合、共振器内部損失  $L_i=4\%$ , 出力鏡透過率  $T_{oc}=10\%$  のとき、光-光変換効率が  $21.1\%$  と効率が向上している。同様に共振器内部損失  $L_i=8\%$  の場合も効率が向上している。このことから、高密度励起を用いた高利得化により、青色半導体レーザー励起連続波  $\text{Ti:sapphire}$  レーザーの高効率化が可能であると考えられる。さらに、集光強度  $I_p=400\ \text{[kW/cm}^2]$  の場合では、共振器内部損失  $L_i=4\%$ , 出力鏡透過率  $T_{oc}=10\%$  のとき光-光変換効率が  $21.1\%$  と、緑色半導体レーザー励起の世界最高効率  $21.6\%$  と同等の効率が得られた。また、集光強度  $I_p=800\ \text{[kW/cm}^2]$  の場合も、緑色半導体レーザー励起の世界最高効率同様の効率が得られることが効率計算から得られた。図 4 に集光強度  $I_p=800\ \text{[kW/cm}^2]$ , 共振器内部損失  $L_i=8\%$  の場合の出力鏡透過率  $T_{oc}$  ごとのビーム径比に対する光-光変換効率を示す。

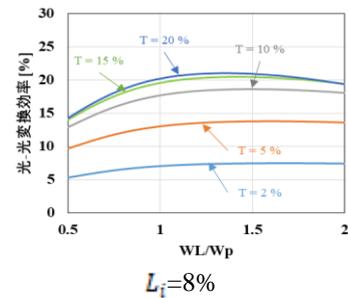


図 4 集光強度  $I_p=800\ \text{[kW/cm}^2]$  の場合のビーム径比に対する光-光変換効率

共振器内部損失  $L_i=8\%$ , 出力鏡透過率  $T_{oc}=20\%$  のとき光-光変換効率が  $21.1\%$  と同様の効率が得られた。このことから、損失が高い場合でも高密度励起による高利得化が高効率化に有効であると考えられる。

## まとめ

青色半導体レーザーを用いた高密度励起連続波  $\text{Ti:sapphire}$  レーザーの効率に関する理論解析を行った。解析により、青色半導体レーザーを用いた高密度励起は、集光強度  $I_p=800\ \text{[kW/cm}^2]$  の場合、共振器内部損失  $L_i=8\%$ , 出力鏡透過率  $T_{oc}=20\%$  のとき、光-光変換効率  $\eta_{oo}$  は  $21.1\%$  が望める。

## 参考文献

- [1] P. W. Roth, et al. "Power scaling of a diode-laser-pumped  $\text{Ti:sapphire}$  laser," Opt. Express20 (18), pp. 20629-20634, August 2012.
- [2] K. Gurel, et al. "Green-diode-pumped femtosecond  $\text{Ti:Sapphire}$  laser with up to 450 mW average power," Opt. Express23 (23), pp. 30043-30048, November2015.
- [3] W. P. Risk, "Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses," J. Opt. Soc. Am. B 5(7), pp.1412-1423, July1988.