

# モード同期レーザーの損失を与える位置が 効率に及ぼす影響に関する理論解析

小林 亮<sup>†</sup>, 片岡 俊二<sup>†</sup>, 青柳 優宇<sup>††</sup>, 柴田 真志<sup>††</sup>, 前田 隼哉<sup>††</sup>, 川戸 栄<sup>†††</sup>  
<sup>†</sup>福井大学工学研究科 電気・電子工学専攻 〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1  
<sup>††</sup>福井大学工学部 電気・電子工学科  
<sup>†††</sup>福井大学学術研究院 工学系部門  
 河仲 準二<sup>††††</sup>  
<sup>††††</sup>大阪大学レーザー科学研究所

## はじめに

フェムト秒からピコ秒域のパルス幅を持った超短パルスレーザーは、比較的小さなエネルギーの出力から高いピークパワーを得るといった特徴などから、加工・医療・通信・測定など、様々な分野で応用されている。高出力超短パルスレーザーの応用分野を拡大するためには、装置の価格低減が必要となる。このためには、安価な光学素子を利用した装置構成の単純なレーザーがふさわしく、複雑な増幅器を用いずに、単純な発振器の高出力化が望ましい。発振器の高出力化のためのキャビティダンプは、安価な光スイッチを用いるとその挿入損失に起因して効率が低下する。高出力化に起因する損失を回避するにはチャープパルスモード同期が有効であるが、高分散かつ安価な光学素子を利用すると、その損失に起因して効率が低下する。高出力化のためには、これらの挿入損失の影響を解析する必要がある。このため、共振器内部で損失を与える位置がモード同期レーザーの効率に及ぼす影響に関して理論解析を行った。

## シミュレーション方法

本研究では、拡張された非線形シュレディンガー方程式[1]、

$$T_R \frac{\partial A(T,t)}{\partial T} = \left\{ g \left( 1 + \frac{1}{\Omega_g^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) - l_c - s[A(T,t)] + \left( i \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} - i \delta |A(T,t)|^2 \right) \right\} A(T,t) = 0 \quad (1)$$

を用いた。ここで、モード同期を可飽和損失 $s_0$ 、飽和パワー $P_{sa}$ の高速過飽和吸収体でモデル化した。 $g$ ,  $s[A(T,t)]$  は、それぞれ利得、高速可飽和吸収体による吸収損失、非線形係数であり、

$$g = g_0 / (1 + P/P_{sa}) \quad (2)$$

$$s[A(T,t)] = s_0 / (1 + |A(T,t)|^2 / P_{sa}) \quad (3)$$

$$\delta = 2\pi L n_2 / \lambda_0 S \quad (4)$$

と定義した。また、式(2)における不飽和利得 $g_0$ は吸収を考慮した励起パワー $P_{pump}$ を用いて、[2]

$$g_0 = \sigma \tau (f_1 + f_2) \frac{\eta_p P_{pump}}{h\nu_p} r_p(r,z) - N_{tot} f_1 \sigma \quad (5)$$

と表せる。(1)~(5)で用いた記号については表1に示す。

表1 式(1)~(5)で用いた記号

$T_R$	共振器往復時間	$A$	電場包絡線
$\Omega_g$	利得帯域幅	$l_c$	共振器損失
$\beta_2$	2次分散	$P$	共振器内部での パワー
$P_{sat}$	利得飽和パワー	$L$	結晶長
$n_2$	非線形屈折率	$\lambda_0$	中心波長
$S$	ビーム断面積	$\sigma$	誘導放出断面積
$\tau$	蛍光寿命	$\eta_p$	励起量子効率
$f_1$	下準位ボルツマン分布	$f_2$	上準位ボルツマン分布
$h$	プランク定数	$\nu_p$	励起周波数
$r_p$	励起光分布関数	$N_{tot}$	全イオン数

利得は利得媒質で与え、損失は出力鏡と高速可飽和吸収体で与えた。自己位相変調は利得媒質で与えた。共振器内の2次分散はGTIチャープミラーでまとめて与えた。数値解析の手法としてスプリットステップフーリエ法を用いた。解析に用いたパラメータは、文献[3]を参考にした。利得媒質は、Yb:YAGを想定し、利得帯域幅は半値全幅で7.6 nm、利得スペクトル形状はローレンツ型とした。利得媒質の結晶長を1 mm、非線形屈折率を69  $\mu\text{m}^2/\text{GW}$ とした。利得媒質のレーザー光のビーム断面積は結晶内で一定とし、1000  $\mu\text{m}^2$ とした。高速可飽和吸収体のパラメータは、可飽和損失を1とし、飽和パワーを5 kWとした。繰り返し周波数は61.7 MHzとした。出力鏡の透過率は20%、残留損失は5%とした。変化させるパラメータとしては、吸収に対する励起パワーを0.3W~6.2Wの範囲で計算を行った。パルスの共振器往復回数は10000回とし、集束の判定は最終的な往復回数のパルス波形とその半分の往復回数での波形の2乗誤差が1%以下であることを収束の条件とした。出力パワーは式(1)から得られた結果を用い、励起パワーは式(5)から導出し、その比をとることで光-光変換効率の導出を行った。

## シミュレーション結果

シミュレーションでは、損失を定在波共振器の①利得媒質透過前、②往路利得媒質透過後、③往路利得媒質透過後に与え、効率がどう変化するか調べた。図1に損失を片道でのみ与えた場合の励起パワーに対する光-光変換効率のグラフを示す。

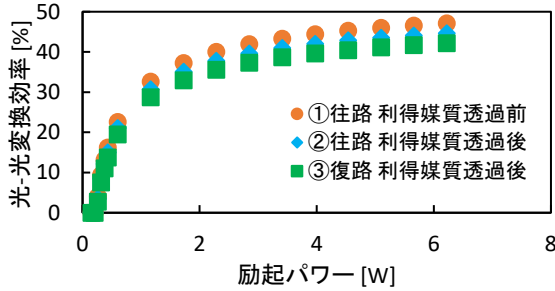


図1 損失を片道で与えた場合の光-光変換効率に対する励起パワー依存性

損失を片道で与えた場合、3点の中で共振器内部パワーが最も低い往路の利得媒質透過前の位置に損失を挿入すると効率が他の2点よりも高くなった。

定在波共振器では、一般的に損失を片道のみで与えるというのは難しい。より現実的なモデルで考えるために、損失を往復で与えたモデルでシミュレーションを行った。ここでは利得媒質の位置に対して、(a)OC側で与える場合と(b)HR側で与える場合の2パターンを想定した。図2に損失を往復で与えた場合の光-光変換効率に対する励起パワー依存性のグラフを示す。

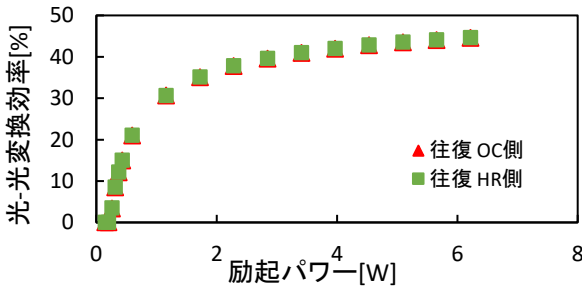


図2 損失を往復で与えた場合の光-光変換効率に対する励起パワー依存性

図2から、往復で損失を与えた場合は片道で損失を与えた場合と異なり、効りに違いはほとんど見られなかった。これはOC側で損失を与える場合には、共振器内部パワーの最も高い復路利得媒質透過前と、最も低い利得媒質透過前の2点で与えているため、平均を取ると往路利得媒質透過後の内部パワーとほぼ同じになるためだと考えられる。

定在波共振器と異なり、進行波共振器ならば、利得媒質の前後にのみ損失が与えられる。この条件でもシミュレーションを行った。また図3にそのときの光-光変換効率に対する励起パワー依存性のグラフを示す。

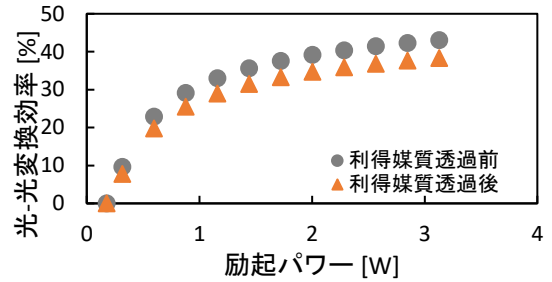


図3 進行波共振器で損失を与えた場合の光-光変換効率に対する励起パワー依存性

図3から、定在波共振器において片道で損失を与えた場合と同様に、進行波共振器においても利得媒質透過前の共振器内部パワーが小さい位置で損失を与えた方が高い効率が得られた。このことから進行波共振器の場合は、損失を与える位置によってその影響を低減できることが確認できた。

## まとめ

本研究では、共振器内部で損失を与える位置がモード同期レーザーの効率に及ぼす影響に関して理論解析を行った。定在波共振器と進行波共振器では片側で与えた場合、共振器内部パワーが最も低い往路の利得媒質透過前の位置に損失を挿入すると効率が最も高くなることが確認できた。また、定在波共振器において往復で損失を与える現実的なモデルを考え、同様に効率と損失を与える位置の関係について解析を行い、効率と損失を与える位置による違いを明らかにした。

今後の展望として、解析により得られた条件を元にキャビティダンプの機構を取り入れたシミュレーションを行い、効率に関する解析を行うことが挙げられる。

## 参考文献

- [1] Herman A. Haus, "Mode-Locking of Lasers", IEEE journal on selected topics in quantum electronics, Vol.6, No.6, November/December 2000
- [2] W. P. Risk. "Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses," J. Opt. Soc. Am. B/Vol.5, No.7/July 1988.
- [3] S. Matsubara, M. Takama, M. Inoue, S. Kawato, Y. Ishida, "Generation of 65-fs ultrashort pulses at 1030-nm center wavelength directly from Kerr-lens mode-locked Yb:YAG laser", Proceedings of CLEO2010, CTuV2 (2010).