

# 測距装置用小型アイセーフ Er:Glass パッシブ Qスイッチレーザの開発

Development of a compact eye-safe Er:Glass passive Q-switch laser  
for a laser range finder

柳澤 隆行, 秋野 陽介, 平野 嘉仁

Takayuki YANAGISAWA, Yousuke Akino and Yoshihito HIRANO

三菱電機(株)

Mitsubishi Electric Corporation

**Abstract:** A compact eye-safe Er:Glass passive Q-switch laser with a  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  crystal was developed suitable for a range finder. Q-switched output energy of 5.0 mJ with TEM<sub>00</sub>-mode oscillation and 11.1 mJ with multimode oscillation using corner cube reflector were obtained. The ground-state absorption cross section of  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  was estimated to be  $2.4 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  at the wavelength of 1.57  $\mu\text{m}$ .

## 1. はじめに

パッシブ Q スイッチは、EO Q スイッチ、AO Q スイッチなどに比べ、直線偏光発振、および、外部制御が不要で、光学部品点数を少なくできることから、野外での使用に適した高信頼で小型のパルスレーザを構成するのに有効な方式である。波長 1 $\mu\text{m}$  帯では、大きな吸収断面積と安定した結晶構造を持つ  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  をパッシブ Q スイッチ材料として用いたレーザ装置が、多数報告されている。しかし、屋外での使用が前提となる測距装置では、アイセーフティの制限から高出力化が困難であった。一方、波長 1.5 $\mu\text{m}$  帯のレーザは、波長 1 $\mu\text{m}$  のレーザに比べて  $10^5$  倍の最大許容露光量(MPE)を有するため、アイセーフティが高く、屋外においても高エネルギー出力が可能である。これまで、波長 1.5 $\mu\text{m}$  帯のパッシブ Q スイッチ材料として、 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ [1],  $\text{U}^{2+}:\text{CaF}_2$ [2]など、Er 系、U 系の材料が報告されてきた。しかし、これらの材料は、吸収断面積が小さく、吸収飽和に必要なエネルギー密度が大きいため、高効率発振には共振器内に集光レンズが必要であった。さらに、飽和エネルギー密度が結晶のダメージしきい値と同程度になり、損傷しやすいという課題があり、高い信頼性を実現することが困難であった。一方、近年報告された  $\text{Co}:\text{MALO}$  ( $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}:\text{Spinel}$ )[3]は、吸収断面積が Er 系や U 系の材料に比べて1桁大きく、高効率動作が可能な Q スイッチ材料として注目されている。しかし、文献により大きく異なる吸収断面積が報告されており[3,4,5], 詳細な評価が必要であった。そこで、 $\text{Co}:\text{MALO}$  の透過特性測定と Er:Glass レーザ媒質を用いたレーザ発振試験を行い、野外使用に適した小型アイセーフパッシブ Q スイッチレーザ装置を開発したので報告する。

## 2. $\text{Co}:\text{MALO}$ の透過特性

$\text{Co}:\text{MALO}$  の吸収断面積には複数の値 ( $1.2 - 3.5 \times 10^{-19} [\text{cm}^2]$ )[3,4,5]が報告されている。レーザ発振時に必要な飽和エネルギー密度と、共振器を構成する光学部品のダメージしきい値に近い値となるため、損傷を抑制し、かつ、高効率動作を行うためには、実際に使用する  $\text{Co}:\text{MALO}$  の吸収断面積を把握する必要がある。そこで、 $\text{Co}:\text{MALO}$  (厚さ  $t=1.40\text{mm}$ ,  $1.06\text{mm}$ ,  $0.75\text{mm}$ ) について、吸収断面積の測定を行い、計算との比較により、誘導吸収断面積を求めた。

パッシブ Q スイッチの材料は、入射するレーザ光が吸収されることにより、下準位のイオン数を減少させて透過率を変化させる。被測定材料が十分薄く、伝搬方向の下準位イオン密度分布が小さい場合、光子密度の時間変化  $\phi(t)$  を持つパルス光が入射したときの透過率  $T_{SA}$  は、以下のレート方程式で与えられる。

$$T_{SA} = \frac{\int \phi(t) \exp(-(\sigma_{GSA} n_{SAI} + \sigma_{ESA} n_{SAu}) d_{SA}) dt}{\int \phi(t) dt} \quad (1)$$

$$\frac{dn_{SAI}}{dt} = -c_0 \phi(t) \sigma_{GSA} n_{SAI} + \frac{n_{SAu}}{\tau_{SAf}}, \quad n_{SAu} = n_{SATotal} - n_{SAI}$$

ここで、 $n_{SATotal}$  は Co の全イオン密度、 $n_{SAI}$  は下準位イオン密度、 $n_{SAu}$  は上準位イオン密度、 $\sigma_{GSA}$  は下準位吸収断面積、 $\sigma_{ESA}$  は上準位 ESA 吸収断面積、 $\tau_{SAf}$  は上準位寿命、 $d_{SA}$  は厚さ、 $c_0$  は光速である。実際の入射パルスは空間分布を持つため、式(1)を空間積分して透過率を導出する。

Fig.1 に透過率測定系を示す。パルス光源として、Nd:YAG Q スイッチ出力を基本波とし、KTP を用いた OPO 出力(波長 1.57 $\mu$ m)を用いた。

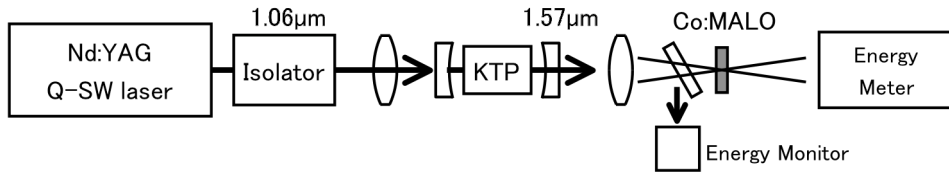


Fig. 1. Measurement setup of Co:MALO transmittance.

Fig. 2 に初期透過率  $T_{SA}=0.885$  (厚さ 1.06mm) の測定結果と計算結果を示す。3種類の厚さ ( $t=1.40$ mm, 1.06mm, 0.75mm) の Co:MALO について、 $\sigma_{GSA}=2.4 \cdot 10^{-19}$  [cm<sup>2</sup>]の時、測定結果と計算結果が良く一致することが分かった。

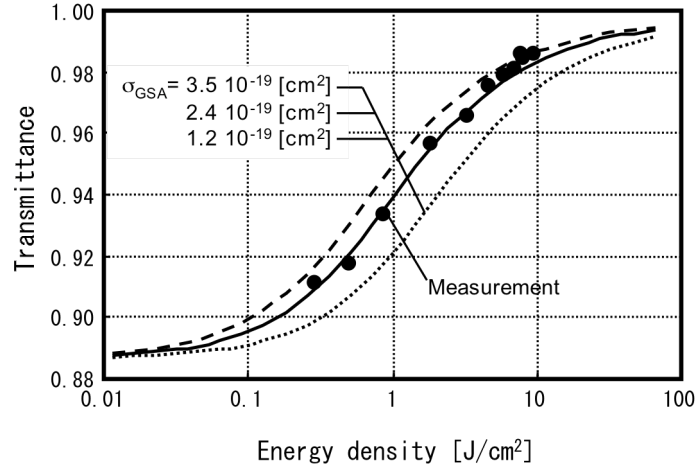


Fig. 2. Measurement and calculated results of Co:MALO transmittance as a function of input energy density. Initial transmission of Co:MALO is 0.885.

### 3. レーザ発振動作

#### 3.1 ベンチトップ試験結果

Fig. 3 に、ベンチトップ試験に用いた共振器構成を示す。レーザ媒質としてフラッシュランプ励起の Er,Yb,Cr:Glass (ロッド半径 1.5mm) を用いた。共振器基本モードのビーム半径は 0.73mm であり、マルチモード共振器となっている。以下の3つの条件について、入出力特性を測定した。

- 条件 A. 出力鏡反射率 0.85, Co:MALO 初期透過率 0.91
- 条件 B. 出力鏡反射率 0.81, Co:MALO 初期透過率 0.91
- 条件 C. 出力鏡反射率 0.85, Co:MALO 初期透過率 0.88

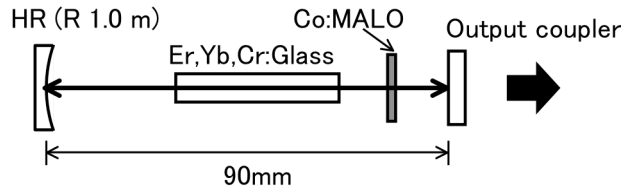


Fig. 3. Experimental setup of an Er:glass passive Q-switch laser using Co:MALO

Fig. 4 に、A～C 各条件における入出力特性を示す。ランプ投入エネルギー7.2～10.3 [J]で第1パルスが発生した。全ての条件において、第1パルスは TEM<sub>00</sub> モード発振が得られ、最大出力として 5.0mJ(パルス幅 24ns) が得られた。投入エネルギーを増加すると複数パルスの発生し、階段状の入出力特性となった。また、第1パルスで取り出せなかった残留利得の影響により、第2パルス以降はマルチモード発振となっている。

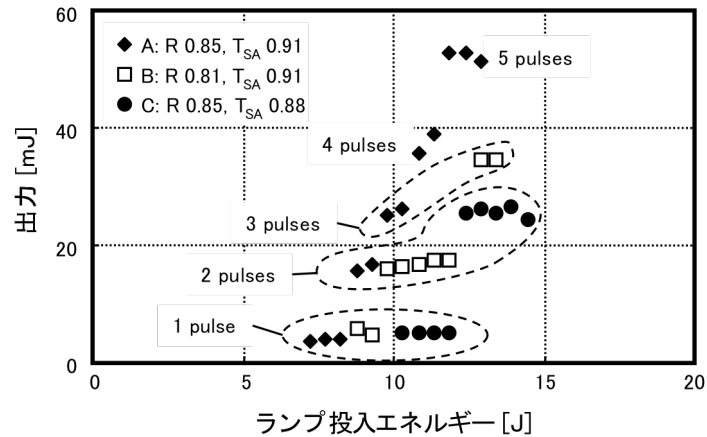


Fig. 4. Output results of the Er:glass passive Q-switch laser using Co:MALO

測定により得られた Co:MALO の吸収断面積を用いて、第1パルスに対するシミュレーションを行った。Table 1 にシミュレーション結果と測定結果の比較を示す。測定結果とシミュレーション結果はほぼ一致しており、吸収断面積の測定結果、および、シミュレーションの妥当性を確認した。

Table 1. Comparison of measurement and simulated results of the output energy.

Condition	Reflectance	Initial transmission of Co:MALO	Laser output energy [mJ]	
			Measurement	Simulation
A	0.85	0.91	3.7	4.1
B	0.81		4.9	4.3
C	0.85	0.88	5.0	5.5

### 3.2 小型アイセーフ Er:Glass レーザ装置開発結果

シミュレーションにより共振器条件の最適化を行い、小型アイセーフ Er:Glass レーザ装置の開発を行った。Fig. 5 に共振器構成を示す。準不安定共振器を用いたビームオーバーラップの向上, Co:MALO 初期透過率最適化, 出力鏡反射率最適化, および, 部品点数低減による低損失化により, 高出力/高効率化を実現した。また, コーナーキューブを反射鏡として用いることにより, レーザ共振器の高信頼化をはかっている。最適化の結果, Co:MALO の初期透過率を 0.93, 出力部分反射膜反射率を 0.84 とした。開発したレーザ共振器部の大きさは, 55mm(長さ)×30mm(幅)×30mm(高さ)である。

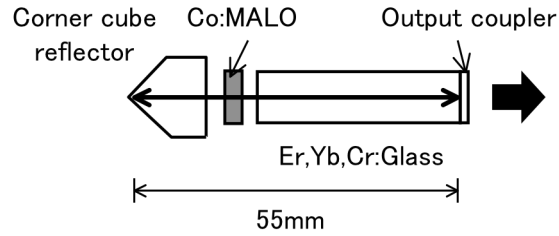


Fig. 5. Cavity configuration of the developed compact eye-safe Er:Glass passive Q-switched laser.

Fig. 6 に入出力特性を示す. 第1パルスで出力エネルギー11.1 mJが, パルス幅 20 ns で得られ, 測距装置に適した特性を達成した.

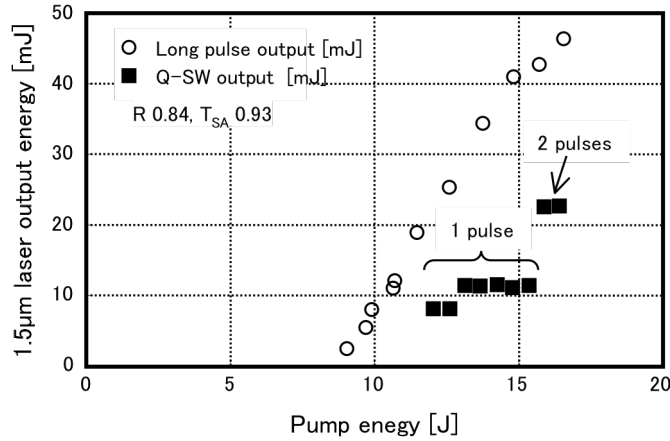


Fig. 6. Output results of the developed compact eye-safe Er:Glass passive Q-switched laser.

#### 4. まとめ

波長 1.5μm 帯のパッシブ Q スイッチ材料 Co:MALO の吸収特性の評価, および, ベンチトップによるレーザ発振動作を行い, 小型で高い信頼性を有する測距装置用 Er:Glass パッシブ Q スイッチレーザ装置の開発を行った. その結果, Co:MALO の吸収断面積を  $\sigma_{GSA} = 2.4 \cdot 10^{-19} \text{ [cm}^2\text{]}$  とすると, 測定結果と計算結果が良く一致することが分かった. また, 3種類の共振器条件でベンチトップ試験を行い, TEM<sub>00</sub> モード出力で 5.0 mJ (パルス幅 24 ns) を達成すると共に, シミュレーションの妥当性を確認した. 共振器条件の最適化設計により, 小型化, 高出力化をはかり, Er:Glass をレーザ媒質として用いたパッシブ Q スイッチ出力としては世界最高の, 出力エネルギー 11.1 mJ (パルス幅 20 ns) を実現した.

#### <参考文献>

[1] M.B. Camargo, et. al., “Passive Q-switching of the Erbium:Glass laser using Er<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub>”, OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers, 1996, Vol.1, 454 (1996).  
 [2] R. Wu, et. al., “Laser diode pumped, passively Q-switched Erbium:Glass laser”, OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers, 1997, Vol.10, 145 (1997).  
 [3] K.V. Yumashev, “Saturable absorber Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystal for Q switching of 1.34-μm Nd<sup>3+</sup>:YAlO<sub>3</sub> and 1.54-μm Er<sup>3+</sup>:glass lasers”, Appl. Opt. **38**, 6343 (1999).  
 [4] K.V. Yumashev, et. al., “Nonlinear absorption properties of Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystal”, Appl. Phys. B **70**, 179-184 (2000).  
 [5] B.Denker, et. al., ASSL99, Paper PD17 (1999).