

# 基于 Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体的被动调 Q 1319 nm Nd:YAG 激光器

林洪沂\*, 刘虹, 张顺钦, 李昱坤

厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024

**摘要** 利用初始透过率为 89.5% 的 Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体作为 1.3 μm 波段的可饱和吸收体, 采用双镜谐振腔, 实现了 1319 nm Nd:YAG 激光器的高效率、低阈值被动调 Q 运转。当抽运功率为 10.0 W 时, 获得平均输出功率为 490 mW, 最窄脉冲宽度为 18.3 ns, 重复频率为 17.5 kHz, 对应单脉冲能量为 28.1 μJ, 峰值功率高达 1533 W 的脉冲激光。结果表明, Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体在 1.3 μm 处具有良好的可饱和吸收特性。

**关键词** 激光器; 1319 nm; Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体; 被动调 Q

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.121404

## Passively Q-Switched 1319 nm Nd:YAG Laser Based on Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Crystal

Lin Hongyi\*, Liu Hong, Zhang Shunqin, Li Yukun

School of Optoelectronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology,  
Xiamen, Fujian 361024, China

**Abstract** A Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystal with an initial transmissivity of 89.5% is used as a saturable absorber at a wavelength of 1.3 μm. A low-threshold and high-efficiency passively Q-switched 1319 nm Nd:YAG laser output is achieved with two-mirror resonator. When the pump power is 10.0 W, a pulsed laser with an average output power of 490 mW, the narrowest pulse width of 18.3 ns, a repetition rate of 17.5 kHz, a pulse energy of 28.1 μJ and a peak power of 1533 W is obtained. The results show that the Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystal possesses a good saturable absorption property at a wavelength of 1.3 μm.

**Key words** lasers; 1319 nm; Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystal; passively Q-switching

**OCIS codes** 140.3070; 140.3480; 140.3540

## 1 引言

被动调 Q 技术是一种产生脉冲激光的简单有效办法, 被动调 Q 脉冲激光器被广泛应用于激光测距、非线性光学、生物医疗、光纤传感和光纤测量等领域<sup>[1-3]</sup>。1.3 μm 脉冲激光器由于光纤吸收损耗较小, 色散近似为 0, 在光信通信中很有优势; 通过倍频和受激拉曼散射, 可以产生红光和 1.5 μm 人眼安全激光; 在医学领域, 可以用于肺部移植和牙齿医疗。

Cr:YAG 晶体是应用最成熟的可饱和吸收体,

可以用其来获得高峰值功率短脉冲激光<sup>[1]</sup>。但 Cr:YAG 晶体只对 800~1200 nm 波段有效, 主要应用于 914, 946, 1064, 1110, 1112, 1123 nm 脉冲激光器。目前, 用于 1.3 μm 激光的可饱和吸收体的主要有 V:YAG、Co:LMA、Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、半导体饱和吸收镜等<sup>[4-7]</sup>。Song 等<sup>[3]</sup>采用 V:YAG 晶体获得了脉宽为 23.9 ns、峰值功率为 954 W 的 1331 nm 脉冲激光。Lin 等<sup>[4]</sup>基于抗辐射激光晶体 Nd:GYSGG 和平凹谐振腔, 利用 Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 可饱和吸收体获得了脉宽为 20.5 ns、峰值功率为 1319 W 的 1331.6 nm 脉冲激光输出。近几年兴起的一些新颖的纳米材

收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-06-08; 录用日期: 2018-06-19

基金项目: 福建省自然科学基金(2016J01683)、福建省中青年教育科研项目(JT180429)

\* E-mail: linyi0714@163.com

料,如石墨烯、氧化石墨烯、黑磷、二硫化钨、二硫化钼、金纳米棒等也具有良好的可饱和吸收特性,但是相对于晶体材料,其损伤阈值较低,产生的重复频率和脉冲宽度偏大,故峰值功率相对较小<sup>[8-10]</sup>。本文采用 Nd:YAG 晶体,利用简单紧凑的双镜谐振腔及 Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 可饱和吸收体,实现了 1319 nm 脉冲激光输出,最窄脉冲宽度为 18.3 ns,最大峰值功率达到 1533 W。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,1319 nm 脉冲激光器的抽运源为光纤耦合的国产 808 nm 半导体激光器(LD),抽运光经耦合透镜聚焦到增益介质内,抽运光的光斑直径约为 200  $\mu\text{m}$ 。该增益介质为 1.1% (原子数分数)掺杂的国产 Nd:YAG 晶体,尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 5 mm,钢箔包裹,铜块加持,被固定在半导体制冷器上。晶体左端(M<sub>1</sub>)镀有 808, 946,1064 nm 的增透膜(HT)(透过率  $T > 95\%$ ),1319 nm 的高反膜(HR)(反射率  $R > 99\%$ );晶体右端镀有 946,1064,1319 nm 增透膜。输出镜 M<sub>2</sub> 为平面镜(PT),在 1319 nm 处的透过率为 16%。可饱和吸收体 Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的厚度为 2 mm,两面镀有 1319 nm 增透膜,初始透过率为 89.5%。谐振腔的长度为 25 mm。输入镜 M<sub>1</sub> 在 946 nm 和 1064 nm 处高透,有利于 1319 nm 激光的振荡。

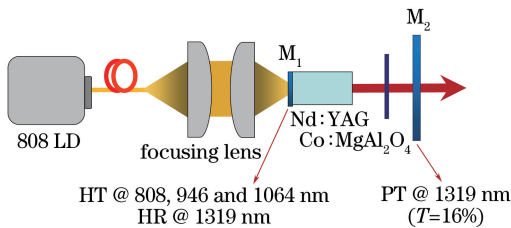


图 1 1319 nm Nd:YAG 脉冲激光器原理图

Fig. 1 Schematic of 1319 nm Nd:YAG pulsed laser

Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体的全称是掺 Co<sup>2+</sup> 镁铝尖晶石,Co<sup>2+</sup> 在 1.2~1.6  $\mu\text{m}$  有较宽的吸收带、很大的吸收截面、较长的激发态寿命及较小的激发态吸收损耗。Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体是 1.5  $\mu\text{m}$  人眼安全波段最理想的被动调 Q 开关,同时在 1.3  $\mu\text{m}$  处也有良好的可饱和吸收特性,其吸收截面  $\sigma_a = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。Nd:YAG 晶体在 1319 nm 处的受激发射截面为  $0.95 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。两个截面的比值为 2.95,有利于被动调 Q 脉冲激光的产生<sup>[4]</sup>。

## 3 结果分析与讨论

首先测量了激光的连续输出特性,抽运阈值约为 2.5 W,当抽运功率为 10.0 W 时,可以获得最大功率为 1853 mW 的连续激光,光光转换效率为 18.5%,斜率效率为 25.9%,如图 2 所示。用光谱分析仪测量了输出光谱和光斑轮廓,中心波长为 1319.49 nm。同时采用光束质量分析仪测量了输出光的三维光斑图,光斑的对称性较好,如图 3 所示。

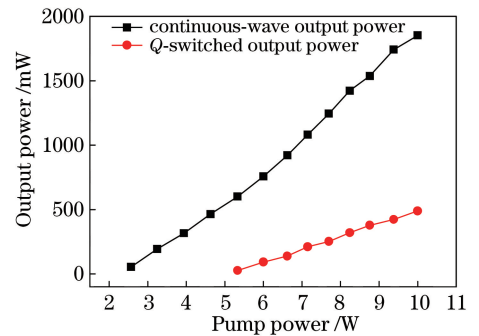


图 2 1319 nm 激光的输出功率曲线

Fig. 2 Output power of 1319 nm laser

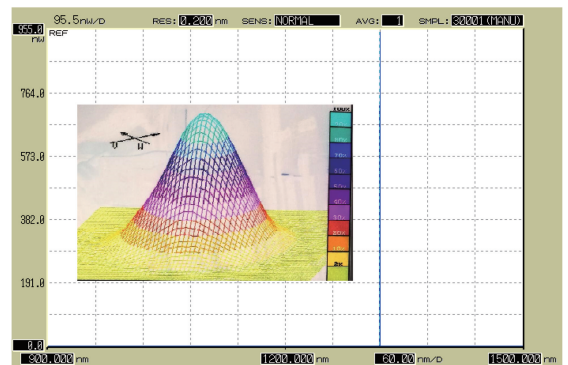


图 3 1319.5 nm 激光器输出光谱与光斑图

Fig. 3 Output spectrum and spot image of 1319.5 nm laser

当谐振腔内插入 Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 后,抽运阈值增加到 5.3 W,最大平均输出功率减小到 490 mW;输出波长保持不变,仍为 1319.5 nm。图 4 所示为当抽运功率为 10.0 W 时,1319.5 nm 激光器的脉冲序列,可以看出,脉冲很稳定。测量了不同抽运光功率下,重复频率与脉冲宽度随抽运光功率的变化曲线,如图 5 所示,重复频率随着抽运功率的增加基本呈线性增加,最大可以达到 17.5 kHz;脉冲宽度的变化很小,基本在 19.2~18.3 ns 之间变化。计算了单脉冲能量和峰值功率,如图 6 所示,当抽运功率由

6.0 W增加到 10.0 W 时,单脉冲能量由 21.4  $\mu\text{J}$  增加到 28.1  $\mu\text{J}$ ,并出现饱和现象;峰值功率由 1123 W 增加到 1533 W。

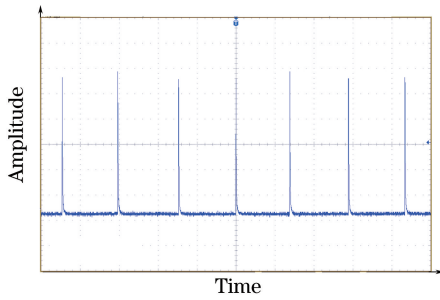


图 4 抽运功率为 10.0 W 时 1319.5 nm 激光器的脉冲序列

Fig. 4 Pulse sequence of 1319.5 nm laser at pump power of 10.0 W

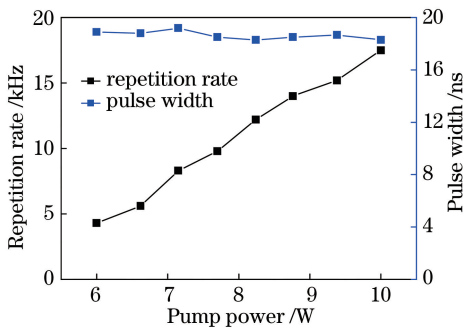


图 5 重复频率与脉冲宽度随抽运光功率的变化曲线

Fig. 5 Repetition rate and pulse width versus pump power

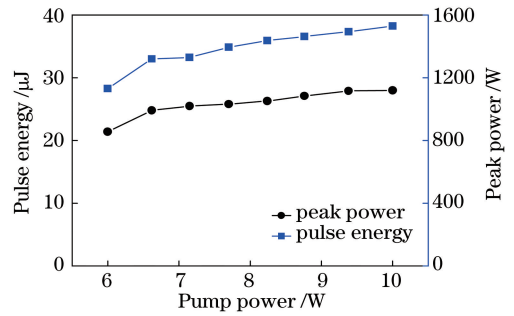


图 6 单脉冲能量与峰值功率随抽运光功率的变化曲线

Fig. 6 Single pulse energy and peak power versus pump power

表 1 所示为 1.3  $\mu\text{m}$  附近被动调 Q 掺  $\text{Nd}^{3+}$  激光器的输出特性。与  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体相比,  $\text{Nd}:\text{YAG}$  晶体在 1.3  $\mu\text{m}$  处的受激发射截面更小,更有利于被动调 Q 运转,因而  $\text{Nd}:\text{YAG}$  晶体能产生更高的峰值功率<sup>[6-7]</sup>;与  $\text{Nd}:\text{GYSGG}$  晶体相比,  $\text{Nd}:\text{YAG}$  晶体的受激发射截面大小相近,但是其导热系数更高(约为  $\text{Nd}:\text{GYSGG}$  晶体的三倍),更有利于窄脉冲宽度和高峰值功率激光的产生<sup>[3-4]</sup>。而可饱和吸收体  $\text{V}:\text{YAG}$  晶体具有更大的吸收截面 ( $7.2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ ),但考虑到  $\text{Nd}:\text{YAG}$  较小的发射截面,  $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  晶体同样满足被动调 Q 第二阈值条件,单脉冲能量和峰值功率等参数良好。  $\text{Co}:\text{LMA}$  晶体的吸收截面为  $2.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ,与  $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  晶体相差不大,可饱和吸收性能类似。

表 1 1.3  $\mu\text{m}$  附近被动调 Q 激光器的输出特性

Table 1 Output performances of passively Q-switched lasers near 1.3  $\mu\text{m}$

Laser	Wavelength /nm	Saturable absorber	Pulse energy / $\mu\text{J}$	Pulse width /ns	Peak power /W
$\text{Nd}:\text{YAG}$ (proposed)	1319.0	$\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$	28.10	18.3	1533
$\text{Nd}:\text{GYSGG}$ <sup>[3]</sup>	1331.0	$\text{V}:\text{YAG}$	22.80	23.9	954
$\text{Nd}:\text{GYSGG}$ <sup>[4]</sup>	1331.6	$\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$	27.20	20.5	1319
Ceramic $\text{Nd}:\text{YAG}$ <sup>[5]</sup>	1319.0	$\text{V}:\text{YAG}$	7.83	128.0	61
$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ <sup>[6]</sup>	1342.0	$\text{V}:\text{YAG}$	3.30	9.3	350
$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ <sup>[7]</sup>	1342.0	$\text{Co}:\text{LMA}$	14.50	42.0	346

## 4 结 论

采用  $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  可饱和吸收体实现了 1319 nm 被动调 Q 脉冲激光的输出,脉冲宽度仅有 18.3 ns,单脉冲能量为 28.1  $\mu\text{J}$ ,峰值功率达到 1533 W。与其他  $\text{V}:\text{YAG}$ 、 $\text{Co}:\text{LMA}$  及纳米材料可饱和吸收体相比,  $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  晶体在 1.3  $\mu\text{m}$  波段具有良好的饱和吸收特性。

## 参 考 文 献

- [1] Li M L, Meng P B, Yan F J, *et al.* Progress on passively Q-switched solid-state lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 090001. 李梦龙, 蒙裴贝, 颜凡江, 等. 高重频被动调 Q 固体激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 090001.
- [2] Li N, Pang Y, Lu Y H, *et al.* 800 mJ high beam

- quality all-solid-state 1319 nm pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(8): 0802007.
- 李楠, 庞毓, 鲁燕华, 等. 800 mJ 高光束质量全固态 1319 nm 脉冲激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802007.
- [3] Song T, Li P, Chen X H, *et al.* Passively Q-switched Nd:GYSGG laser operating at 1.3  $\mu\text{m}$  with V:YAG as saturable absorber [J]. Optik, 2016, 127(22): 10621-10625.
- [4] Lin H Y, Sun D, Copner N, *et al.* Nd:GYSGG laser at 1331.6 nm passively Q-switched by a Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystal[J]. Optical Materials, 2017, 69: 250-253.
- [5] Li P, Chen X H, Zhang H N, *et al.* Diode-end-pumped passively Q-switched 1319 nm Nd:YAG ceramic laser with a V<sup>3+</sup>:YAG saturable absorber[J]. Laser Physics, 2011, 21(10): 1708-1711.
- [6] Malyarevich A M, Denisov I A, Yumashev K V, *et al.* V:YAG : A new passive Q-switch for diode-pumped solid-state lasers[J]. Applied Physics B, 1998, 67(5): 555-558.
- [7] Huang H T, He J L, Zuo C H, *et al.* Co<sup>2+</sup>:LMA crystal as saturable absorber for a diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 1342 nm[J]. Applied Physics B, 2007, 89(2/3): 319-321.
- [8] Ling W J, Xia T, Dong Z, *et al.* WS<sub>2</sub> saturable absorber for passively Q-switched Tm, Ho:LLF lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703020. 令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于 WS<sub>2</sub> 可饱和吸收体的被动调 Q Tm, Ho:LLF 激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703020.
- [9] Huang H T, Li M, Jin L, *et al.* Passively Q-switched 1  $\mu\text{m}$  solid-state laser using gold nanorod as saturable absorber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703021. 黄海涛, 李敏, 金琳, 等. 金纳米棒饱和吸收体 1 $\mu\text{m}$  被动调 Q 固体激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703021.
- [10] Lin H Y, Zhang J Y. Nd:YAG laser at 1112.3 nm passively Q-switched by graphene-oxide saturable absorber[J]. Optik, 2018, 156: 265-267.