

# Yb:GdCOB 晶体被动调 Q 脉冲激光器实验研究

代启彪<sup>1</sup> 易红英<sup>1</sup> 田雪苹<sup>1</sup> 韩文娟<sup>1,2</sup> 刘均海<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071  
<sup>2</sup> 山东省高校光子学材料与技术重点实验室(青岛大学), 山东 青岛 266071

**摘要** 以 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体作为可饱和吸收体,利用平-凹谐振腔实现了 Yb:GdCOB 晶体的被动调 Q 激光运转。当沿 X 轴切割的厚度为 2.0 mm 的晶体吸收抽运功率为 6.3 W 时,所产生的沿 Z 主轴方向偏振的平均脉冲输出功率达到 0.62 W,脉冲重复率为 3.6 kHz,相应的单脉冲能量、脉冲宽度和峰值功率分别为 172  $\mu$ J、20 ns 和 8.6 kW。

**关键词** 激光器; Yb<sup>3+</sup> 激光器; 被动调 Q; Yb:GdCOB 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0802002

## Experimental Study on Passively Q-Switched Laser with Yb:GdCOB Crystal

Dai Qibiao<sup>1</sup> Yi Hongying<sup>1</sup> Tian Xueping<sup>1</sup> Han Wenjuan<sup>1,2</sup> Liu Junhai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Physics, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Photonics Materials and Technology in Universities of Shandong, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

**Abstract** Passively Q-switched laser operation with Yb:GdCOB crystal is demonstrated in a plano-concave resonator, utilizing a Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber. When the absorbed pump power of the 2-mm thick X-cut crystal is 6.3 W, an average pulsed output power of 0.62 W, with polarization parallel to the Z principal axis, is generated at a pulse repetition frequency of 3.6 kHz. The resulting pulse energy, duration, and peak power are 172  $\mu$ J, 20 ns, and 8.6 kW, respectively.

**Key words** lasers; Yb<sup>3+</sup> laser; passive Q-switching; Yb:GdCOB crystal

**OCIS codes** 140.3615; 140.3540; 140.3480

## 1 引 言

随着发射波长为 970~980 nm 的光纤耦合高亮度 InGaAs 半导体激光器的发展,以此为抽运源的 Yb<sup>3+</sup> 固体激光器的研究得到广泛关注。与传统的振荡波长为 1.06  $\mu$ m 的 Nd<sup>3+</sup> 激光器相比,Yb<sup>3+</sup> 激光器的突出优点包括:激光发射过程所产生的量子缺损显著降低;不存在浓度猝灭和上转换等不利作用过程;激光介质具有宽得多的发射谱,有利于通过锁模技术产生超短脉冲<sup>[1-2]</sup>。此外,相对于 Nd 激光材料而言,Yb 激光介质一般具有小的受激发射截面和长的荧光寿命,从而具有大的储能本领,这

对于发展高能量脉冲激光器具有重要意义。

在目前已知的有重要应用前景的 Yb 激光晶体中,Yb:GdCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(Yb:GdCOB)和 Yb:YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(Yb:YCOB)两种晶体的受激发射截面与其他晶体相比小得多,而其荧光寿命则长得多<sup>[3-4]</sup>。GdCOB 和 YCOB 是一类对称性很低的稀土钙氧硼酸盐(点群为 *m*),为单斜晶系的双轴晶体。这类晶体是上世纪九十年代中期首次被合成,最初被用作非线性光学晶体,但不久即被证明也可作为 Yb<sup>3+</sup> 的基质晶体<sup>[3-4]</sup>。随后,研究人员对 Yb:GdCOB 晶体的光谱性质和激光特性开展了很多实验研究。相关

收稿日期: 2013-01-17; 收到修改稿日期: 2013-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(60978023)

作者简介: 代启彪(1989—),男,硕士研究生,主要从事 Yb<sup>3+</sup> 激光器方面的研究。E-mail: qibiao.dai@yahoo.com.cn

导师简介: 刘均海(1964—),男,理学博士,教授,主要从事新型激光晶体和全固态激光器等方面的研究。

E-mail: junhai\_liu@hotmail.com(通信联系人)

工作包括:实现了可调谐激光运转,其波长调谐范围超过 100 nm<sup>[5]</sup>;实现了被动锁模激光运转,所产生的激光脉冲宽度为 90 fs<sup>[6]</sup>;获得了功率为 5~7 W 的连续波激光输出,并发现该晶体所产生的连续波激光振荡会呈现复杂的偏振态变化行为<sup>[7-9]</sup>。然而,尽管 Yb:GdCOB 晶体的储能本领高于大多数 Yb<sup>3+</sup> 晶体,其在脉冲激光器方面的应用潜力还很少受到关注。实际上,该晶体的基本脉冲激光特性尚未见报道。

本文报道了 Yb:GdCOB 晶体被动调 Q 脉冲激光特性的初步实验结果。利用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体作为可饱和吸收体,以光纤耦合半导体激光器为抽运源,实现了 Yb:GdCOB 晶体的被动调 Q 脉冲激光运转,获得了稳定的高能量激光脉冲。

## 2 实验装置

实验中 Yb:GdCOB 晶体被动调 Q 激光器由平-凹谐振腔构成,如图 1 所示。其中平面镜 M1 靠近晶体的一面镀有对 1020~1200 nm 波段高反,同时对 808~980 nm 波长范围高透的介质膜;而另一面镀有对 800~1000 nm 波段的增透膜。输出耦合镜 M2 为曲率半径为 50 mm 的凹面镜,在 1030 nm 的透射率  $T=20\%$ 。实验中使用的激光晶体(LC)Yb:GdCOB 的 Yb<sup>3+</sup> 掺杂浓度(原子数分数)为 15%。晶体样品沿 X 轴切割,厚度为 2.0 mm,横截面为 3.3mm×3.3 mm,样品两个端面未镀增透膜。为减轻晶体热效应对激光振荡的影响,晶体样品置入水冷铜块内,冷却水温度控制在 5 °C。用于产生被动调 Q 的可饱和吸收体(SA)为 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体,其初始透射率  $T_0=97.5\%$ ,晶体的两个端面镀 1.03 μm 的增透膜。实验中所使用的抽运源为高亮度光纤耦合半导体激光器,光纤纤芯直径为 200 μm,数值孔径为 0.22,其中心发射波长随输出功率水平不同在 968~971 nm

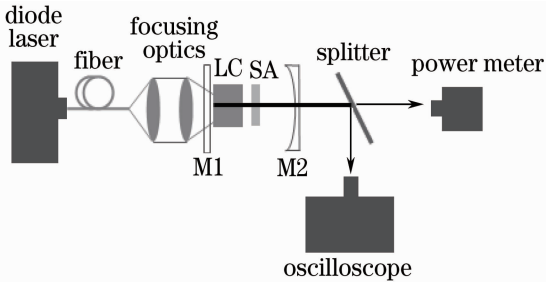


图 1 Yb:GdCOB 被动调 Q 脉冲激光器实验装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram for the passively Q-switched Yb:GdCOB laser

范围内变化。抽运光经一个聚焦系统耦合到 Yb:GdCOB 晶体内,光斑半径约为 100 μm。激光器谐振腔的长度为 28 mm。利用一个分束器,可同时由功率计(OPHIR NOVA II型)测量 Yb:GdCOB 激光器产生的输出功率,由示波器(Infiniium DSO80304B 型, Agilent Co. Ltd., 3 GHz, 40 G Sa/s)测量激光脉冲参数,或由光谱仪(Avantes AvaSpec-3648 型)测量激光发射谱。

## 3 实验结果和讨论

利用图 1 所示的实验装置,实现了 Yb:GdCOB 晶体的被动调 Q 激光运转。图 2 给出了实验测量的平均脉冲输出功率随晶体吸收抽运功率的变化关系。作为比较,图中还给出了相同谐振腔条件下得到的连续波激光振荡输出特性。无论是连续波还是脉冲运转,所产生的激光输出均为沿 Z 轴方向的线偏振光,这与文献[9]报道的连续波激光振荡偏振方向一致。

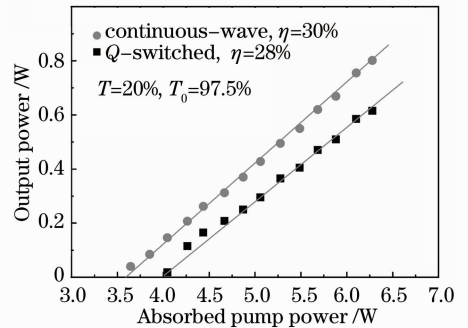


图 2 Yb:GdCOB 激光器输出功率随晶体吸收抽运功率的变化

Fig. 2 Output power versus the absorbed pump power of Yb:GdCOB laser

由图2看出,Yb:GdCOB 晶体调 Q 运转的阈值抽运功率为 4.05 W。随着抽运功率的升高,所产生的平均输出功率近似呈线性增加。在抽运功率为 6.3 W 时,脉冲激光平均功率为 0.62 W,相应的光-光转换效率为 10%,斜率效率为 28%。在相同的谐振腔条件下,连续波激光运转的阈值抽运功率为 3.6 W。当晶体所吸收的抽运功率为 6.3 W 时,连续波激光输出功率为 0.80 W,相应的斜率效率为 30%。调 Q 运转的平均输出功率与连续波输出功率之比为 0.78,显示出较高的调 Q 效率。与连续波激光运转相比,调 Q 运转的斜率效率略有降低,这是由腔内可饱和吸收体的附加损耗所引起的。

实验中 Yb:GdCOB 晶体的被动调 Q 激光运转

所使用的输出镜具有较高的透射率( $T=20\%$ ),这是为了避免对腔内元件产生光损伤。在调 Q 运转条件下,低的输出耦合透射率将导致腔内形成过高的峰值功率密度,容易使光学元件表面出现损伤。另外,较高的输出镜透射率也有利于产生较短的激光脉冲。当然,降低可饱和吸收体的初始透射率 $T_0$ ,可以有效地提高单脉冲能量和减小脉冲宽度。除了 $T_0=97.5\%$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体之外,实验中也尝试使用了 $T_0=95\%$ 的可饱和吸收体,但未能实现稳定的调 Q 脉冲激光振荡。

图 3 为抽运功率为 5.6 W 时测量得到的调 Q 以及连续波运转的激光发射谱。从图中看出,连续波激光发射谱很宽,在 1030.0~1039.2 nm 范围内

均有激光振荡产生。实际上,具有宽的发射谱也是 $\text{Yb}^{3+}$ 激光器连续波运转的一般特征,这一点与传统的 $\text{Nd}^{3+}$ 激光器有很大的差异。在图 3(b)所示的连续波发射谱中,存在约 10 条分立的谱线,相邻谱线的间隔约为 1 nm。应当指出,这些发射谱线与谐振腔纵模之间并不存在一一对应的关系。这些分立的谱线实际上起因于未镀膜的 Yb:GdCOB 晶体表面与谐振腔的平面镜 M1 之间所形成的空气隙标准具作用,谱线间隔相对应于该标准具(厚度约为 0.5~0.6 mm)的自由光谱范围。由图 3(b)可以看出,在被动调 Q 运转条件下,激光发射谱变得很窄,仅包含一条 1035 nm 的主要谱线,这是被动调 Q 过程中所伴随的纵模选择作用结果<sup>[10]</sup>。

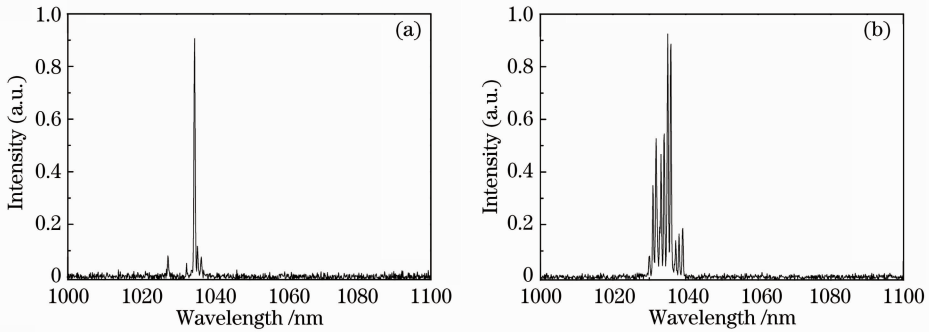


图 3 抽运功率为 5.6 W 时测量得到的激光发射谱。(a) 调 Q 运转; (b) 连续波运转

Fig. 3 Laser emission spectra measured when absorbed pump power is 5.6 W. (a) Q-switched operation; (b) continuous-wave operation

对于被动调 Q 激光运转,激光脉冲重复频率一般随抽运功率增加而升高。图 4 所示在输出耦合镜透射率为 20%,可饱和吸收体初始透射率为 97.5%的条件下,Yb:GdCOB 晶体激光器的脉冲重复频率随晶体吸收抽运功率的变化情况。在振荡阈值附近,脉冲重复频率很低,约为 0.25 kHz;随抽运功率升高,脉冲重复频率近似线性增加;在晶体最高吸收抽运功率为 6.3 W 时,脉冲重复频率达到 3.6 kHz。

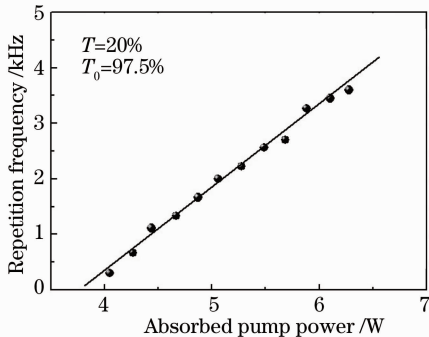


图 4 脉冲重复频率随晶体吸收抽运功率的变化  
Fig. 4 Repetition frequency versus the absorbed pump power

由图 2 给出的最大脉冲输出功率测量值(0.62 W),可得到此时的单脉冲能量为 172  $\mu\text{J}$ 。

与激光脉冲重复频率随抽运功率的变化不同。实验表明,Yb:GdCOB 晶体激光器被动调 Q 所产生的激光脉冲轮廓和脉冲宽度随抽运功率的升高仅有微小的变化。图 5 为晶体吸收抽运功率为 5.3 W 时测量得到的单脉冲轮廓和稳定的脉冲串。在略高于阈值时,脉冲宽度为 22.5 ns;随着抽运功率的增加,

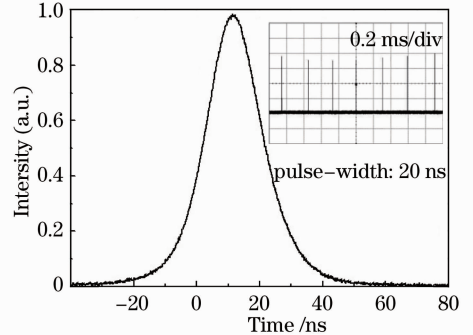


图 5 被动调 Q 产生的脉冲轮廓和脉冲串  
Fig. 5 Pulse profile and pulse train of passively Q-switched operation

脉冲宽度为 20 ns,基本保持不变。激光脉冲的上升沿和下降沿基本上是对称的,表明实验所选定的被动调 Q 条件(包括输出耦合透射率和可饱和吸收体的初始透射率等)是适宜的<sup>[11]</sup>。

由平均输出功率和脉冲重复频率可以得到单脉冲能量。随吸收抽运功率的增加,单脉冲能量基本保持不变(涨落不超过 10%),平均能量为 160  $\mu\text{J}$ 。图 5 所示稳定的脉冲串和图 6 单脉冲能量的微小变化表明,Yb:GdCOB 在该实验条件下得到了稳定的脉冲振荡。由平均单脉冲能量(160  $\mu\text{J}$ )和脉冲宽度(20 ns),可得到平均脉冲峰值功率为 8.0 kW。利用以色列 Duma Optronics Ltd. 公司生产的 BeamOn IR1550 型光束分析仪测得,输出激光的光束质量因子分别为  $M_x^2=2.3$  和  $M_y^2=2.17$ ,远场光斑轮廓如图 7 所示。

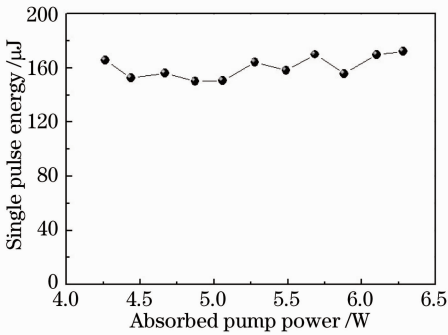


图 6 单脉冲能量随吸收抽运功率的变化

Fig. 6 Pulse energy versus absorbed pump power

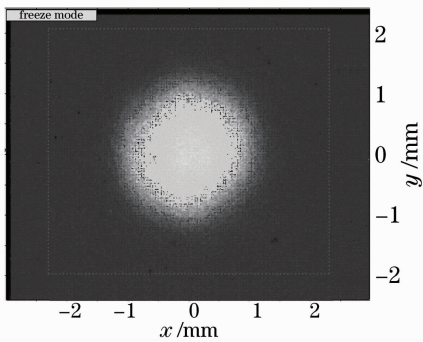


图 7 远场光斑轮廓图

Fig. 7 Laser profile in far field

## 4 结 论

实现了以  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体作为可饱和吸收体的 Yb:GdCOB 晶体被动调 Q 激光运转。在谐振腔输出耦合透射率为 20%、可饱和吸收体初始透射率为 97.5% 的条件下,获得了重复频率为 3.6 kHz、最大平均功率为 0.62 W 的 1035 nm 脉冲激光振荡,相应的单脉冲能量、脉冲宽度和峰值功率分别为 172  $\mu\text{J}$ 、20 ns 和 8.6 kW。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Haikun, Cui Xuelong, Xu Jinlong, *et al.*. CW mode-locked Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> femtosecond laser with a semiconductor saturable-absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1102002.
- 2 Zhang Yongdong, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo, *et al.*. Laser diode pumped efficient continuous wave and picoseconds Yb:YGG laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202005.
- 3 张海鹏, 崔雪龙, 徐金龙, 等. 基于半导体可饱和吸收镜锁模的 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 飞秒激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1102002.
- 4 Zhang Yongdong, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo, *et al.*. Laser diode pumped efficient continuous wave and picoseconds Yb:YGG laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202005.
- 5 张永东, 魏志义, 张治国, 等. 激光二极管抽运的高功率 Yb:YGG 激光器的连续及锁模运转[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202005.
- 6 A Brenier. A new evaluation of Yb<sup>3+</sup>-doped crystals for laser applications[J]. J Lumin, 2001, 92(3): 199–204.
- 7 G Boulon. Yb<sup>3+</sup>-doped oxide crystals for diode-pumped solid state lasers: crystal growth, optical spectroscopy, new criteria of evaluation and combinatorial approach[J]. Opt Mater, 2003, 22(2): 85–87.
- 8 F Mougel, K Dardenne, G Aka, *et al.*. Ytterbium-doped Ca<sub>4</sub>GdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>: an efficient infrared laser and self-frequency doubling crystal[J]. J Opt Soc Am B, 1999, 16(1): 164–172.
- 9 F Druon, F Augé, F Balembos, *et al.*. Efficient, tunable, zero-line diode-pumped, continuous-wave Yb<sup>3+</sup>:Ca<sub>4</sub>LnO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (Ln=Gd, Y) lasers at room temperature and application to miniature lasers[J]. J Opt Soc Am B, 2000, 17(1): 18–22.
- 10 F Augé, F Balembos, P Georges, *et al.*. Efficient and tunable continuous-wave diode-pumped Yb:Ca<sub>4</sub>GdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> laser[J]. Appl Opt, 1999, 38(6): 976–979.
- 11 F Druon, F Balembos, P Georges, *et al.*. Generation of 90-fs pulse from a mode-locked diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:Ca<sub>4</sub>GdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> laser[J]. Opt Lett, 2000, 25(6): 423–425.
- 12 S Chénais, F Druon, F Balembos, *et al.*. Multiwatt, tunable, diode-pumped CW Yb:GdCOB laser[J]. Appl Phys B, 2001, 72(4): 389–393.
- 13 O Svelto. Principles of Lasers [M]. Berlin: Springer, 2010. 325–327.
- 14 J J Zayhowski, P L Kelley. Optimization of Q-switched lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1991, 27(9): 2220–2225.

栏目编辑:张 腾