

doi: 10.3788/gzxb20124110.1145

LD 端面泵浦 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q 激光器 输出特性研究

杨晓冬^a, 侯新华^b

(嘉应学院 a. 物理与光信息科技学院; b. 应学院数学学院, 广东 梅州 514015)

摘 要:对激光二极管端面泵浦 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q Nd : YAG 激光器输出特性进行了实验研究. 实验研究发现, 激光器输出功率及脉冲重复频率随谐振腔长度增大而增大. 为解释这一实验现象, 测量了泵浦光斑在激光晶体内尺寸, 同时计算了激光晶体及 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体内的基模激光光斑半径随谐振腔长度变化. 分析结果表明: 激光晶体内泵浦光斑尺寸远小于激光晶体内基模光斑半径, 腔模间交叠效率较低; 当腔长增加时, 激光晶体内的基模激光光斑减小, 腔模间交叠效率增加, 从而导致输出功率及脉冲重复频率随腔长增加而增加; 另外, $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体光斑半径也随谐振腔长度减小, 引起 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体漂白时间缩短, 导致脉冲重复频率随腔长增加而增加.

关键词: $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$; 交叠效率; 被动调 Q; 脉冲重复频率

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)10-1145-4

0 引言

激光二极管(Laser Diode, LD)泵浦的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q 激光器具有结构简单、价格低廉、运转可靠等显著特点, 在激光测距等领域有广泛的应用^[1-8]. 利用 LD 端面泵浦 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 结构, 曾获得脉冲重复频率为 200 kHz、脉冲宽度为 8 ns、峰值功率达到 6 kW 的被动调 Q 脉冲激光输出^[8]. LD 泵浦 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q 激光器输出特性与激光谐振腔结构有密切关系.

本文对 LD 泵浦的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q 晶体 Nd : YAG 激光器输出特性进行了实验研究, 同时从激光器的谐振腔结构出发, 对实验中所观察到的输出功率及脉冲重复频率随谐振腔长度增大而增加的现象, 进行了实验及理论分析.

1 实验装置

实验所使用的装置为大恒光电公司研制的半导体泵浦固体激光器综合实验仪, 其结构如图 1: LD 被固定在带有半导体制冷器(TEC)的热沉上, LD 最大驱动电流为 2 A, 最大 808 nm 泵浦光功率约为 1.6 W, LD 发射的 808 nm 的泵浦光经过整形汇聚镜, 汇聚进入 Nd : YAG 激光晶体; 激光晶体尺寸为 $\phi 3 \times 5$ mm, Nd : YAG 晶体左端面镀有 808 nm 增透

及 1 064 nm 高反膜, 右侧镀 1 064 nm 增透模, 输出耦合镜曲率半径为 20 cm, 1 064 nm 透射率为 3%, $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q 晶体位于 Nd : YAG 激光晶体与输出耦合镜之间, $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体的两端面镀有 1 064 nm 增透模, 晶体的初始透射率为 89.4%, 其厚度约为 1 mm. 图中各元件被固定在长度 70 cm 长的导轨上, 谐振腔所能达到的最小长度约为 10 cm.

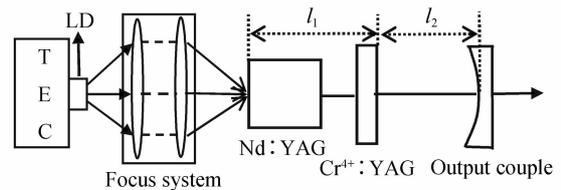


图 1 LD 泵浦 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q 激光器示意图
(激光谐振腔长 $l = l_1 + l_2$)

Fig. 1 Schematic of LD pumped $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ passively Q-switched laser (laser cavity length $l = l_1 + l_2$)

2 实验结果与分析

2.1 被动调 Q 激光输出随泵浦电流变化

在 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体距离 Nd : YAG 晶体左端面 $l_1 = 4$ cm, 距离输出耦合镜 $l_2 = 7$ cm, 谐振腔长度为 11 cm 条件下, 测量了被动调 Q 激光器输出特性随泵浦电流变化曲线, 测量结果如图 2. 由图 2 可以看出, 被动调 Q 激光器输出激光功率和脉冲重复频

基金项目: 广东省自然科学基金 (No. 8451401501000668) 和广东省实验室管理委员会项目资助

第一作者: 杨晓冬, 男 (1968 -), 博士, 教授, 主要研究方向为固体激光技术. Email: xjyxd@126.com

收稿日期: 2012-04-18; 修回日期: 2012-06-10

率都随泵浦电流增大而增加,而脉冲宽度下降.在驱动电流为 1.6 A 时,激光器最大输出功率为 131 mW,脉冲重复频率为 11.1 kHz,脉冲宽度为 47 ns.上述实验结果与文献[3]报道相同,产生上述现象原因为:随泵浦功率增加,Nd:YAG 晶体反转粒子数密度增长速度变大,腔内光子数密度增长速度也变大,被动调 Q 晶体两次被漂白时间间隔缩短,从而导致被动调 Q 激光器的脉冲重复频率变大;同时由于腔内净增益系数变大,腔内光子数增长及反转粒子数衰减将更为迅速,脉冲建立及熄灭过程更短,脉冲宽度更窄.

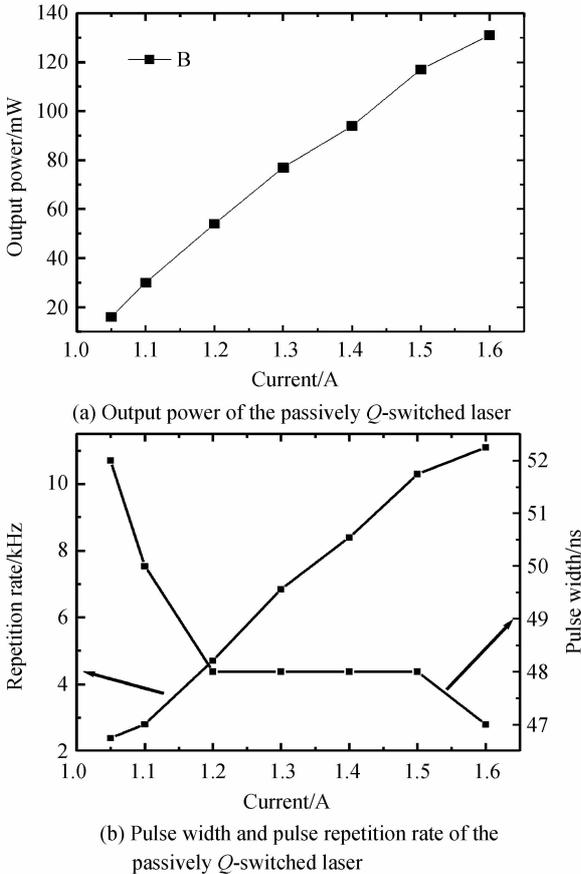


图2 激光器输出随泵浦电流变化
Fig. 2 The output of the passively Q-switched laser with the pump current

2.2 激光谐振腔长度对输出特性的影响

在 LD 驱动电流为 1.3 A, Cr⁴⁺:YAG 晶体距 Nd:YAG 晶体左端面 $l_1 = 4$ cm 条件下,测量了激光器连续运转输出功率、被动调 Q 脉冲运转输出功率、脉冲重复频率及脉冲宽度随谐振腔长度变化曲线,测量结果如图 3 所示.由图 3 可以看出,激光谐振腔长度从 11 cm 开始,随着腔长的增加,激光器连续及脉冲运转输出功率、脉冲重复频率首先出现略微下降,但当腔长大于 16 cm 时,激光器连续运转、脉冲运转输出功率、脉冲重复频率都随谐振腔长增加而显著增长,其中调 Q 脉冲重复频率在腔长为

11 cm 时为 6.8 kHz,而当腔长增大为 19.5 cm 时,脉冲重复频率增长为 10.4 kHz.上述实验结果与激光理论及文献[9]存在一定的差异,根据激光物理理论,在泵浦功率固定的条件下,当谐振腔变长时,谐振腔菲涅尔数减小,衍射损耗增加^[10],腔内净增益下降,导致激光器输出功率、被动调 Q 激光脉冲重复频率都将下降,文献[9]已观测到脉冲输出功率及脉冲重复频率随谐振腔长度增加而下降的实验现象.

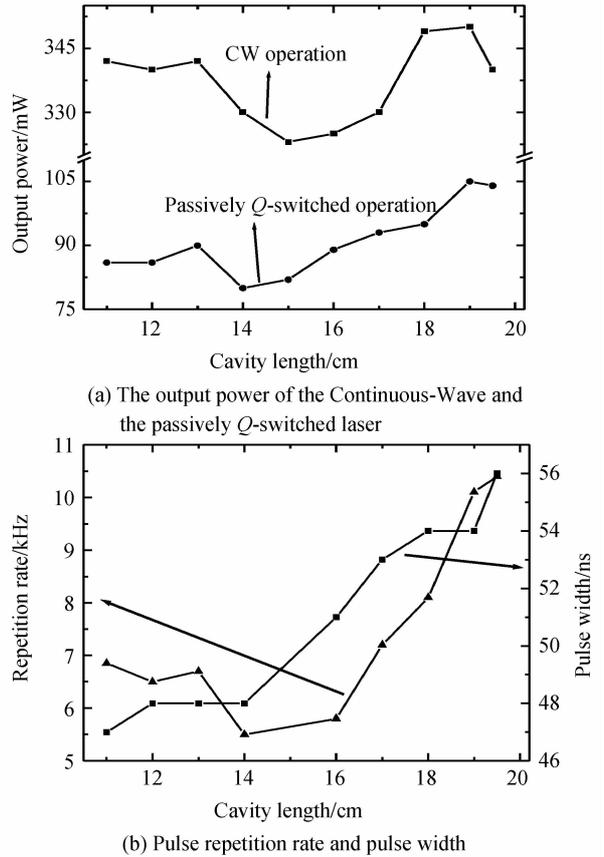


图3 激光器输出随腔长变化
Fig. 3 The output of the passively Q-switched laser with the cavity length

本文认为,产生上述实验现象主要由于以下两方面原因:1)激光晶体中,相对于腔模光斑直径而言,泵浦光斑尺寸较小,而本实验中,激光晶体内腔模直径会随谐振腔长度增加而减小,从而使泵浦光与腔模间交叠效率提高,使得激光器输出功率和脉冲重复频率都随谐振腔长度的增加而增加.为了说明这一点,利用刀口法测量了整形汇聚镜后方,泵浦光光斑尺寸(包含 90% 泵浦光能量)沿光束传播方向的分布,测量结果如图 4.另外,结合图 1,根据高斯光束在谐振腔内的传输矩阵,计算了 Nd:YAG 激光晶体与 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 晶体,基模光斑半径随激光谐振腔长度的变化曲线,计算结果如图 5.由于在 1.3 A 泵浦电流下,泵浦功率很低,计

算过程忽略热焦距对谐振腔结构的影响. 由图 4 可以看出,沿光束传播方向,在 5 mm 范围内(本实验使用 Nd:YAG 晶体长度为 5 mm),最大泵浦光斑尺寸不超过 0.25 mm,多数泵浦能量集中在尺寸为 0.22 mm 的光斑内. 另由图 5(a)可以看出,当谐振腔长度小于 16 cm 时,激光谐振腔内光斑直径大于 3.2 mm,谐振腔光斑直径远大于泵浦光斑尺寸,晶体内泵浦光与振荡激光交叠度较差,且腔模光斑半径随谐振腔长度变化平缓;当谐振腔长度大于 16 cm 时,晶体内激光光斑半径随谐振腔长

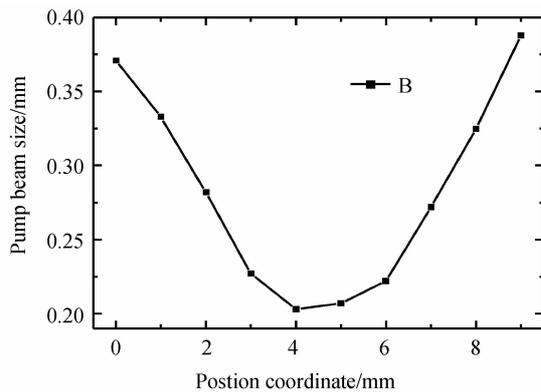
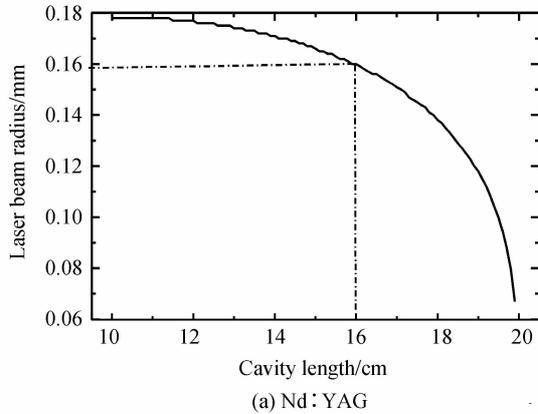
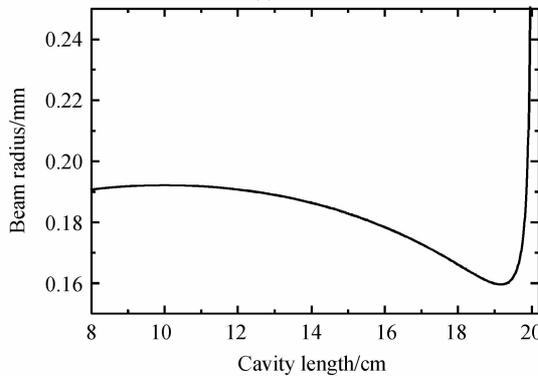


图 4 整形后泵浦光尺寸变化曲线

Fig. 4 Plot of the shaped pump laser beam radius



(a) Nd:YAG



(b) Cr⁴⁺:YAG

图 5 Nd:YAG 激光晶体内基模光斑半径随腔长度变化曲线

Fig. 5 Plots of fundamental mode beam radius in the Nd:YAG and the Cr⁴⁺:YAG crystal with the cavity length

度的增加而迅速下降,激光晶体内腔模交叠效率迅速提高^[11],导致谐振腔内增益增长较快,输出功率与脉冲重复频率增加;2)由图 5(b)可以看出,Cr⁴⁺:YAG 晶体内腔模光斑直径随谐振腔长度增加而减小,这也使 Cr⁴⁺:YAG 晶体内光功率密度提高,Cr⁴⁺:YAG 晶体两次漂白的时间时间间隔降低,晶体对静态激光的利用率提高,从而引起脉冲重复频率及激光器输出功率增加^[12]. 同时,在腔长大于 16 cm 时,Cr⁴⁺:YAG 晶体内,腔模光斑直径随谐振腔长度增加而减小的速度显著加快,因此在腔长大于 16 cm 时,脉冲重复频率及激光器输出功率随谐振腔长度增加的速度将加快. 由于在实验中所观测到的,连续波激光输出功率在腔长大于 16 cm 时,随谐振腔长度增加,激光输出功率不降反升,由此可以断定上述现象是这两种因素的共同作用.

文献[9]实验装置示意图与本实验结构类似,都使用 Nd:YAG 晶体的一端面作为谐振腔全反射镜,但文献[9]得出脉冲运转输出功率及脉冲重复频率随谐振腔长度变长而减小的结论. 由于文献[9]中,输出耦合镜的曲率半径、输出镜透射率及泵浦光尺寸未给出,所以这里无法准确分析两实验得到不同实验结果的原因. 在文献[9]报道的实验中,输出耦合镜如果为平面镜,当泵浦功率较高时,热效应可以使谐振腔成为稳定腔,此时激光晶体内腔模光斑半径随腔长度增加而增加,这时可以出现文献[9]所报道的脉冲运转输出功率及脉冲重复频率随谐振腔长度变长而减小的现象,但此时激光发射阈值应当较高. 在文献[9]中,实验所得最佳透射率约为 3%~7%,而阈值泵浦电流接近 14 A(本实验仅为 1 A),所以无法排除文献[9]使用腔镜为平面输出镜的可能.

3 结论

本文对平凹腔 Cr⁴⁺:YAG 晶体被动调 Q 激光器输出特性进行了实验研究,并对实验中所出现输出功率和脉冲重复频率随腔长增加而增加的现象进行了分析研究,结果表明,泵浦光与腔模交叠效率以及 Cr⁴⁺:YAG 晶体中光斑半径对激光器输出特性有较大影响.

参考文献

- [1] GOLDBERG L, MCINOSH C, COLE B. VCSEL end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser with adjustable pulse energy[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(5): 4261-4267.
- [2] XU Shi-xiang, LI Wen-xue, HAO Qiang, et al. Efficient laser-diode end-pumped passively Q-switched mode-locked Yb:LYSO laser based on SESAM[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, **25**(2): 548-551.

- [3] NIU Rong-lian, LIU Cheng-cheng, LIU Ying, *et al.* Thermal lensing effect of diode-pumped Yb : KGd(WO₄)₂ based on convective heat-transfer on the side surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 79-82.
牛荣莲, 刘成成, 刘莹, 等. 基于侧面热对流的 LD 泵浦 Yb : BKGd(WO₄)₂ 热透镜效应研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(1): 79-82.
- [4] LUAN Fei, FENG Su-ya, CHEN Li, *et al.* Effect of upconversion on Er³⁺-Yb³⁺ Co-doped phosphate glass passively Q-switched laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **31**(sup1): 53-56.
栾飞, 冯素雅, 陈力等, 上转换效应对 Er³⁺-Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光输出的影响[J]. 光子学报, 2008, **31**(sup1): 53-56.
- [5] LIU Shao-long, ZHU Shao-lan, ZHAO Wei, *et al.* Investigation on repetition rate stability of Cr⁴⁺ : YAG passively Q-switched microchip laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1717-1721.
刘少龙, 朱少岚, 赵卫, 等. Cr⁴⁺ : YAG 被动调 Q 微晶片激光器重复频率稳定性研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(9): 1717-1721.
- [6] YANG X Q, WANG H X, HE J L, *et al.* A compact passively Q switched intra-cavity frequency doubled Nd : YAG/Cr⁴⁺ : YAG composite crystal green laser[J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(10): 1964-1968.
- [7] CHEN Zhu-chong, RUAN Shuang-shen, GUO Chun-yu, *et al.* Passively Mode-locked Erbium doped fiber ring laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 267-270.
陈祖聪, 阮双琛, 郭春雨, 等. 环形腔被动锁模掺铒光纤激光器[J]. 光子学报, 2012, **41**(3): 267-270.
- [8] MAO Xiao-jie, MI Guo-jiang, DENG Min-fa, *et al.* 200 kHz, 8 ns passively Q-switched high peak power Nd : YAG laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **37**(11): 20-23.
毛小杰, 秘国江, 邓明发, 等. 200 kHz, 8 ns 被动调 Q 高峰值功率 Nd : YAG 激光器[J]. 中国激光, 2011, **37**(11): 20-23.
- [9] YANG Yu-bing, CAI De-fang, WANG Shi-yu, *et al.* Experimental study on output characteristics of passively Q-switched laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(1): 46-50.
杨昱冰, 蔡德芳, 王石语, 等. 被动调 Q 激光器输出特性的实验研究[J]. 应用光学, 2006, **27**(1): 46-50.
- [10] 周炳琨, 高以智. 激光原理[M]. 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2009: 38-88.
- [11] KOECHNER W. Solid state laser engineering[M]. SUN Wen, JIANG Zhe-wen, CHENG Guo-xiang, transl. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2003: 88-94.
克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 2 版. 北京: 科学出版社, 2003: 88-94.
- [12] 郭家喜. 连续 LD 泵浦调 Q 技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010: 36-37.

Investigation on the Output Characteristics of LD End-pumped Cr⁴⁺ : YAG Passively Q-switched Laser

YANG Xiao-dong^a, HOU Xin-hua^b

(*a. School of Physics and Optical Information Technology; b. School of Math, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015, China*)

Abstract: The output characteristics of a LD end-pumped Cr⁴⁺ : YAG passively Q-switched Nd:YAG laser are experimentally investigated. The experiment shows that the output power and pulse repetition rate increases with the cavity length. To explain above experiment phenomenon, the pump laser beam sizes in the Nd:YAG crystal are measured, and the fundamental mode laser beam radius in the Nd : YAG crystal and the Cr⁴⁺ : YAG crystal are calculated. The investigations show that two reasons result in the output power and pulse repetition rate increasing with the cavity length. Firstly, the pump beam size in the Nd : YAG crystal is far less than the fundamental mode laser beam in the Nd:YAG crystal. The overlap efficient between pump and the laser beam is low. With the cavity length increasing, the fundamental mode laser beam in the Nd : YAG crystal decreases, which results in the overlap efficient between pump beam and the laser beam increasing. So the output power and the pulse repetition rate increase with the cavity length increasing. Secondly, the laser beam radius in the Cr⁴⁺ : YAG crystal also decreases with the cavity length, which shorten the time interval between two bleaching of the Cr⁴⁺ : YAG crystal. So the pulse repetition rate increases with the cavity length.

Key words: Cr⁴⁺ : YAG; Overlap efficient; Passively Q-switched; Pulse repetition rate