

文章编号: 1001-3806(2005)02-0187-03

## 定向棱镜改善 Cr<sup>4+</sup> YAG 调 Q 输出稳定性的研究

卢常勇,王小兵,郭延龙,王古常,孙 斌,陈 波,程 勇  
(武汉军械士官学校 光电技术研究所,武汉 430075)

**摘要:** 为了改善 Cr<sup>4+</sup> YAG 被动调 Q 激光器的输出稳定性,采用了定向棱镜谐振腔,通过实验得到了以下结果:单脉冲能量稳定度由 7.3% 提高到 2.2%,脉宽稳定度由 13.5% 提高到 6.5%,频率精度由 0.01% 提高到 0.005%,输出脉冲波形稳定光滑。研究表明,采用定向棱镜谐振腔技术的 Cr<sup>4+</sup> YAG 被动调 Q 激光器的输出稳定性较原平面腔激光器得到了显著改善。另外还报道了定向棱镜谐振腔技术消除 Cr<sup>4+</sup> YAG 被动调 Q 激光器子脉冲的现象。

**关键词:** Cr<sup>4+</sup> YAG; 定向棱镜谐振腔; DPL; 输出稳定性

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

### Study on directional prism improving the output stability of Q-switched by Cr<sup>4+</sup> YAG

LU Chang-yong, WANG Xiao-bing, GUO Yan-long, WANG Gu-chang, SUN Bin, CHEN Bo, CHENG Yong  
(Facility of Opto-electronics, Wuhan Ordnance Non-commissioned Officers Academy, Wuhan 400075, China)

**Abstract:** In order to improve the output stability of LD pumped Nd:YAG laser Q-switched by Cr<sup>4+</sup> YAG, the directional prism resonator is used, a single smooth laser pulse has been achieved with the energy stability changing from 7.3% ~ 2.2%, pulse-width stability changing from 13.5% ~ 6.5%, repetition rate stability changing from 0.01% ~ 0.005%. The experimental result shows that compared with the plano-plane resonator, the directional prism resonator improves output stability of the laser greatly. It is reported for the first time that the directional prism resonator can eliminate the tail-pulse.

**Key words:** Cr<sup>4+</sup> YAG; directional prism resonator; DPL; output stability

### 引 言

掺四价铬的钇铝石榴石晶体 (Cr<sup>4+</sup> YAG) 在 0.9 μm ~ 1.2 μm 具有宽的吸收带和良好的可饱和吸收特性,并具有光化学性质稳定、导热性能好、抗激光损伤阈值高、机械稳定性好、效率高等优点,是高功率、高重复频率及小型全固化激光器的理想被动 Q 开关。但 Cr<sup>4+</sup> YAG 被动 Q 开关在平面腔激光器重复频率运行时却往往产生频率和光强起伏较大、热效应严重、易跳模和光轴漂移等现象<sup>[1]</sup>,其宏观表现为输出激光的空间稳定性差(能量稳定性、模式稳定性、光轴稳定性)和时间稳定性差(脉宽稳定性、重频精度稳定性);此外,由于脉冲产生时刻无法控制,当 Cr<sup>4+</sup> YAG 晶体的初始透过率较高时,调 Q 主脉冲后往往会出现子脉冲现象<sup>[2]</sup>,这些使 Cr<sup>4+</sup> YAG 被动调 Q 技术在军用激光测距、制导、雷达等应用中受到限制。

近年来,免调试激光器技术受到关注,由于采用定

作者简介:卢常勇(1979-),男,助理讲师,主要从事光电子技术及军用激光器件的研究与设计。

Email: gdyjs@263.net

收稿日期:2004-02-06;收到修改稿日期:2004-06-07

向棱镜作为全反镜可以有效地弥补平面腔激光器许多缺点,使原本分布不均匀的增益在对称交换穿行振荡过程中趋于均匀,不但增大了低阶模体积,而且实现了对热致应力双折射、热光楔和退偏效应的补偿,使输出能量稳定性、模式稳定性和脉宽稳定性得到明显改善,且因为定向棱镜腔特有的“自准直特性”即对腔镜失调很不灵敏,确保了激光器有足够的热稳定性和机械稳定性<sup>[3,4]</sup>,研究结果表明,定向棱镜谐振腔对改善 Cr<sup>4+</sup> YAG 被动调 Q 激光器输出稳定性亦有贡献。

### 1 Cr<sup>4+</sup> YAG 调 Q 激光器输出稳定性的理论分析

张行愚、吴念乐等人<sup>[2,5]</sup>在速率方程的基础上推导出了 Cr<sup>4+</sup> YAG 被动调 Q Nd<sup>3+</sup> YAG 激光输出能量 E、峰值功率 P、脉冲宽度 W 的数学解,见下式:

$$E = (h\nu A / 2\sigma\gamma) \ln(1/R) \ln(n_i/n_f) \quad (1)$$

$$P = \frac{h\nu A l}{\gamma t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \left\{ n_i - n_t - n_{00} \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) - (n_i - n_{00}) \left[ 1 - \left(\frac{n_i}{n_f}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \right] \right\} \quad (2)$$

$$W = E/P \quad (3)$$

式中,  $h\nu$  为光子的能量,  $A$  为光束在激活介质中的有效横截面积,  $\sigma$  为激活介质的受激发射截面,  $\gamma$  为反转因子, 它相当于产生一个光子所消耗的反转粒子数个数, 与激光能级中各子能级间的弛豫平衡时间及激光下能级寿命的大小有关,  $R$  为输出镜反射率,  $n_i$  为初始反转粒子数密度,  $n_f$  为脉冲结束时反转粒子数密度,  $l$  为激活介质长度,  $t_r$  为光在腔内往返一周的时间,  $n_1$  为  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 的基态粒子数密度,  $n_0 = cn_1$ ,  $c$  视为关于  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 初始透过率的一个常量,  $\alpha = \sigma_1 / \gamma\sigma$ ,  $\sigma_1$  为  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 吸收截面。

$\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调  $Q$  激光器重复频率工作时, 荧光光谱、辐射量的变化、抽运的不均匀性、激活介质掺杂浓度的不均匀性、谐振腔的稳定性、 $\text{Cr}^{4+}$  YAG 饱和和吸收体恢复时间以及激活介质热效应等影响, 使得  $\gamma$ ,  $n_i$ ,  $n_f$ ,  $A$  等参数具有可变性, 导致调  $Q$  脉冲的能量、峰值功率、脉宽和频率精度的不稳定。针对这些因素, 已研究出灯抽运固体激光器中抽运灯带预燃、DPL 中通过对 LD 实施电控手段<sup>[6]</sup>以及预抽运技术<sup>[7]</sup>等措施来提高  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 调  $Q$  激光器输出的稳定性。

而定向棱镜具有“镜像”作用, 振荡光线相对于光轴对称交换穿行, 对各种不均匀造成的激活介质的增益分布不均匀进行了匀化; 准相位共轭效应<sup>[8,9]</sup>对位相畸变进行一定的光学补偿; 棱镜中心的衍射损耗使得激活介质内的光强分布相对均匀, 输出用平顶高斯光束近似描述<sup>[10]</sup>, 改善了激活介质热透镜效应。因此, 定向棱镜谐振腔能够在相当程度上改善  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调  $Q$  激光器输出的稳定性。

## 2 实验与结果

### 2.1 实验装置

在 DPL 上进行了定向棱镜腔改善激光输出稳定性的实验, 并与同等条件下平-平腔的输出稳定性进行比较。实验装置如图 1 所示, 抽运源为 6 个国产 LD 阵列 (每个阵列有 15 个 1cm 标准线阵, 每个线阵峰值

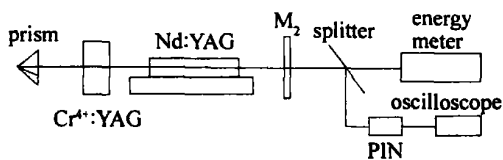


Fig 1 Scheme of experimental setup

功率为 50W), 呈 90°交叉放置, 侧向抽运尺寸为  $\varnothing 4\text{mm} \times 60\text{mm}$  的 Ce-Nd YAG 激活介质。介质的一侧紧贴在散热凹槽上, 实现传导冷却。定向棱镜和平面输出镜构成定向棱镜腔 (同样条件下, 用平面全反射镜更换定向棱镜即可构成平-平腔), 棱镜线宽为 2 $\mu\text{m}$ , 综合角差经 ZYGO 仪检测为 3", 输出镜透过率  $T =$

60%, 腔长为 155mm。用初始透过率分别为 18%, 22%, 48%, 55% 的  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体进行被动调  $Q$ 。

用 ERM1000 型激光功率-能量计监测激光输出, TEK-P6701A 型光电探头和 TDS3052 型 500MHz 数字式存储示波器观察脉冲波形和测定脉宽。

### 2.2 实验结果

在初始透过率为 22% 的  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体调  $Q$  下, 激光器以 20Hz 频率工作, LD 工作电流为 55A, 分别在平-平腔和定向棱镜腔条件下随机抽取 20 个脉冲测量能量、脉宽, 并计算其平均值等参数。两种腔型的能量、脉宽稳定度结果见表 1。

Table 1 Compare of performances between plano-plane resonator and prism resonator lasers

performance	parameter	plano-plane resonator	direction prism resonator
single pulse energy/mJ	average	59.24	60.11
	deviation	$\pm 2.15$	$\pm 0.65$
	stability	7.3%	2.2%
	variance	1.24	0.36
pulse-width /ns	average	11.97	10.14
	deviation	$\pm 0.81$	$\pm 0.33$
	stability	13.5%	6.51%
	variance	0.41	0.21
repetition rate	average	0.05s + 163.51 $\mu\text{s}$	0.05s + 168.66 $\mu\text{s}$
	deviation	$\pm 2.55\mu\text{s}$	$\pm 1.1\mu\text{s}$
	stability	0.01%	0.004%
	variance	1.41 $\mu\text{s}$	0.64 $\mu\text{s}$

在激光制导和敌我识别等应用场合, 需要利用激光反射信号进行编码, 对相邻激光脉冲的时间间隔有很高的要求。而频率精度即指这一间隔时间的稳定度。本实验中 LD 电源电脉冲频率精度为 1 $\mu\text{s}$ , 其信号上升沿为基准, 利用双踪示波器的另一通道监测调  $Q$  巨脉冲出现的时刻, 见图 2, Ch1 为激光脉冲 (与纵轴

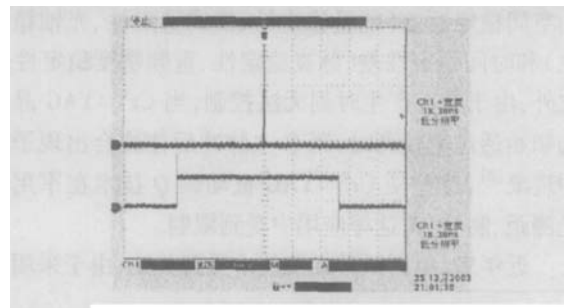


Fig 2 Measurement of repetition rate stability

重合), Ch2 为 LD 电脉冲信号, 记录 1s 内的频率稳定度。平-平腔和定向棱镜腔的脉冲出现时刻绘制于图 3, 其稳定度见表 1。

从以上图表可以看出, 与平-平腔相比, 定向棱镜

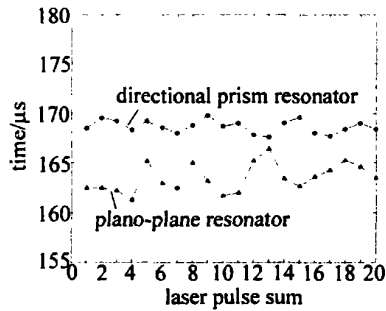


Fig 3 Compare of repetition rate stability

谐振腔对  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 激光器的能量、脉宽和频率精度等方面的稳定性有明显改善。

子脉冲是指每个调 Q 脉冲后跟着的一个脉冲宽度大而峰值功率小的脉冲,这对激光测距而言是十分有害的,可能会导致误测,必须避免子脉冲现象出现。对 4 种不同浓度的多块  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体进行了实验,结果表明:  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 初始透过率较低 (18%, 22%) 时,两种腔型中都没有子脉冲现象,但平-平腔中,激光脉冲后沿不平滑,而定向棱镜腔获得了平滑的脉冲输出;当  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 初始透过率较高 (48%, 55%) 时,平-平腔中存在子脉冲现象,子脉冲与调 Q 脉冲的间隔在 80ns~200ns 之间。而利用定向棱镜更换平面全反射镜后,消除了子脉冲,如图 4 所示。这在以往的文献中尚未见报道。

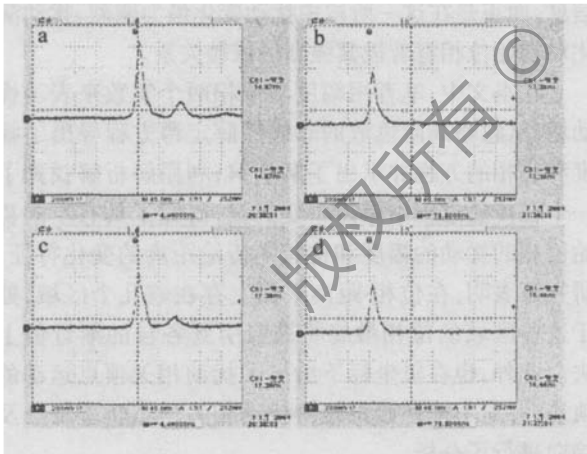


Fig 4 Pulse width of two kinds of resonators under different  $\text{Cr}^{4+}$  YAG transparency

a—plano-plane resonator  $T=48\%$  b—prism resonator c—plano-plane resonator  $T=55\%$  d—prism resonator

### 3 讨论

#### 3.1 定向棱镜腔对输出能量稳定性的改善

导致  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 输出不稳定的主要原因是由于 Nd YAG 的增益较高,很容易形成多模振荡,再加上各模式间的竞争使各模式的强度有起伏,导致输出不稳定<sup>[11]</sup>。而定向棱镜腔的角向选模作用抑制了高阶模振荡,获得了低阶模的输出,提高了激光模式质

量<sup>[3]</sup>,使激光输出趋于稳定;定向棱镜的“镜像”作用还可以对增益进行匀化,使光束在对称交换穿行振荡过程中实现对因激光棒与  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体受热不均匀及温度涨落而引起的光学补偿,使输出能量稳定性和光轴稳定性得到明显改善。

适当变换实验条件,当调 Q 输出 100mJ,以 100Hz 重复频率工作时,观察到平-平腔中的  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体表面有明显的打火现象,易造成晶体的损伤,这是局部强点多的表现;但在定向棱镜谐振腔中,实验观察 2h 均无打火现象。

#### 3.2 定向棱镜腔对脉宽稳定性的改善

实际工作中反转粒子数在激活介质中的分布是不均匀的,各处脉冲建立的时间也是不同的,在平-平腔中输出的脉冲实际上是这些建立的时间间隔不同的脉冲的叠加,故其脉宽是很不稳定的;由于定向棱镜使光束在谐振腔中来回对称穿行振荡,相当于使激活介质中的增益趋于均匀,各处的脉冲几乎是同时建立的,从而达到改善输出脉冲脉宽稳定性的效果。

#### 3.3 定向棱镜腔对频率精度稳定性的改善

平-平腔常产生非光轴上的局部强点,使  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG 在该处率先漂白, Q 开关提前打开,谐振腔储存的能量偏小,这就导致了频率精度的不稳定和脉宽的不稳定。相比之下,定向棱镜谐振腔的“匀光效应”可以削弱非光轴上的局部强点的光功率,使腔内光场分布相对均匀,从而保证  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 在光轴上优先漂白,达到其工作的理想状态,所以能显著提高脉宽和频率精度的稳定性。

#### 3.4 定向棱镜腔消除子脉冲现象

由于平-平腔中激活介质的增益分布不均匀导致腔中局部功率密度过高,使得  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体相应的部分率先漂白,产生一个主调 Q 脉冲,但此时激活介质中的反转粒子数尚未完全消耗,  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体还来不及恢复,透过率仍较高,损耗较小,而抽运光继续抽运,在很短的时间内反转粒子数又超过阈值,再次产生脉冲即子脉冲。如前述由于定向棱镜具有的“匀光效应”可以使腔内光场分布相对均匀,防止局部功率密度过高,从而保证  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 在光轴上优先漂白,达到其工作的理想状态,所以能改善  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 的子脉冲现象。

### 4 结论

在 LD 抽运的 Nd YAG 激光器上做了定向棱镜改善  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 稳定性的实验研究。发现应用定向棱镜后,  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 激光器的输出稳定 (下转第 193 页)



### 3 结 论

采用幅度与位相两个实数表示扰动场,在光纤负色散区和扰动角频率小于截止角频率的情况下,利用线性化的非线性薛定谔方程研究了无损光纤中扰动的演化行为,导出了扰动幅度和位相的解析表达式;计算并讨论了扰动幅度和位相随传输距离的演化规律;在极坐标下给出了扰动相矢顶点运动的轨迹,对不同初始位相的扰动相矢顶点轨迹特征及趋向进行了分析,并与直角坐标下的扰动幅度-位相图结果一起对扰动的演化作了深入讨论。研究表明,扰动幅度和位相的初始演化都对扰动初位相有着强烈的依赖关系。在位相-距离平面上存在着几个区域,处于这些区域的位相最终将被吸引到各自的渐近值上去,以各自的位相渐近值为界,当初始相位值大于渐近值时,扰动位相将单调下降趋于渐近值,反之,则扰动位相将单调上升趋于渐近值,若初始相位值等于渐近值,则扰动位相不随距离而变;若扰动初位相  $\phi_0$  位于第 1 象限或第 3 象限,则扰动幅度单调地增加,若  $\phi_0$  位于第 2 象限或第 4 象限,则扰动幅度先衰减,然后再增加。

### 参 考 文 献

(上接第 189 页)

性有所改善,得到能量稳定性高达 2%,脉冲稳定性为 6.5%,频率精度优于 0.005% 的激光输出,消除了  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 的子脉冲现象,且脉冲波形光滑。可见,定向棱镜腔改善了输出  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 激光器的稳定性。

感谢上海光机所徐军博士提供的  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体。

### 参 考 文 献

- [1] 裴博,包照日格图,周昀 *et al* 内腔式 KTP OPO 发散角的实验研究 [J]. 中国激光, 2002, A29(1): 13~16.
- [2] 张行愚,赵圣之,王青圃 *et al*  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 调 Q 特性的理论和实验研究 [J]. 光学学报, 1998, 18(9): 1180~1185.
- [3] 程勇,孙斌,王小兵 *et al* 一种改善激光光束质量和稳定性的新途径 [J]. 量子电子学报, 1999, 16(3): 217~220.

- [1] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. 2nd ed, New York: Academic Press, 1995. 133~141.
- [2] D'ANOV E M, MAMYSHEV P V, PROKHOROV A M *et al* Generation of a train of fundamental solitons at a high repetition rate in optical fibers [J]. Opt Lett, 1989, 14(18): 1008~1010.
- [3] TRILLO S, WABNITZ S. Ultrashort train generation through induced modulation polarization instability in a birefringent Kerr-like medium [J]. J O S A, 1989, B6(2): 238~249.
- [4] PILOIS S, M'LOT G. Experimental observation of a new modulational instability spectral window induced by four-order dispersion in a normally dispersive single-mode optical fiber [J]. Opt Commun, 2003, 226: 415~422.
- [5] POTASEKM J, AGRAWAL G P. Self-amplitude modulation of optical pulses in nonlinear dispersive fibers [J]. Phys Rev, 1987, A36(8): 3862~3867.
- [6] HCKMANN J M, CAVALCANTI S B, BORGES N M *et al* Modulation instability in semiconductor-doped glass fibers with saturable nonlinearity [J]. Opt Lett, 1993, 18(3): 182~184.
- [7] ABDULLAEV F K, DARMANYAN S A, B'ISCHOFF S *et al* Modulation instability in optical fibers near the zero dispersion point [J]. Opt Commun, 1994, 108: 60~64.
- [8] XU W C, ZHANG S M, CHEN W P *et al* Modulation instability of femtosecond pulses in dispersion-decreasing fibers [J]. Opt Commun, 2001, 199: 355~360.
- [9] 杨爱玲,王晶,苗洪利 *et al* 色散缓变光纤中交叉相位调制不稳定增益谱 [J]. 激光技术, 2003, 27(1): 44~46.

- [4] 程勇,毛少卿,王志怀 *et al* 免调谐固体激光器 [J]. 激光技术, 1999, 23(2): 68~70.
- [5] 吴念乐,吕亚军,陆兴华 *et al* 含  $\text{Cr}^{4+}$  离子饱和吸收体被动调 Q 解析解 [J]. 光学学报, 1996, 16(12): 1813~1818.
- [6] 郑权,邵兰芳,赵岭 *et al*  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 调 Q 全固态激光器可控运转方法研究 [J]. 激光与红外, 2003, 33(3): 194~196.
- [7] 巩马理,闫平,谢韬 *et al* 被动 Q 开关激光器的预抽运技术 [J]. 中国激光, 2003, A30(7): 585~589.
- [8] SCHOLL M S. Ray trace through a corner-cube retro-reflector with complex reflection coefficients [J]. J O S A, 1995, 12(7): 1589~1592.
- [9] WANG Sh M, ZHAO D M, HU L G *et al* Corner cube recognized as super-conjugator [J]. Proc SPIE, 2002, 4914: 182~187.
- [10] 王小兵,孙斌,程勇 *et al* 定向棱镜谐振腔的平顶高斯光束特性 [J]. 激光技术, 2002, 26(2): 117~122.
- [11] 宋晏蓉,李瑞宁,刘媛媛 *et al* 用  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 作调 Q 元件的激光器特性的研究 [J]. 中国激光, 2001, 28(6): 487~490.