

基于增益光栅的单频自调 Q 激光器单频稳定性研究

许云鹏, 李之通, 吴婷, 姜梦华, 惠勇凌, 雷旬, 李强*

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 研究发现,空间光束在增益介质中相互干涉,产生空间烧孔现象,形成增益光栅。简并的四波混频作用形成的增益光栅在谐振腔内多次振荡后,具有产生自调 Q、自适应、窄化带宽和相位共轭激光输出的能力。在掠入射结构的非互易式激光谐振腔中,采用脉冲抽运单块 Nd:YVO₄ 晶体,利用增益光栅的上述特性,分析了影响输出单频稳定性和输出能量的因素,通过优化非互易式器件消光比、增益区域大小、自交叉光夹角等条件实现了单脉冲能量为 0.9 mJ、脉宽为 7.5 ns、线宽为 0.95 pm 的稳定的单纵模调 Q 输出。在本研究检索范围内,这是目前单块增益介质实现的最大能量,可为非互易式增益光栅激光器稳定的单纵模振荡的分析和优化提供参考。

关键词 激光器; 激光光学; 固体激光器; 增益光栅; 单纵模; 掠入射

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0901006

Single-Frequency Stability of Single-Frequency Self-Q-Switched Solid-State Lasers Based on Gain Gratings

Xu Yunpeng, Li Zhitong, Wu Ting, Jiang Menghua, Hui Yongling, Lei Hong, Li Qiang*

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Recent studies have revealed that space beam interferenced in the gain medium would result in space burning hole phenomenon and form the gain grating. The gain grating formed by the four-wave mixing function after multiple oscillations in the resonator has self-adaptive, self-Q-switched and spatial filtering capabilities, and can obtain holographic conjugate output. Based on the above characteristics of the gain gratings in a non-reciprocal laser cavity with a grazing incidence structure, we analyze the factors which affect the output single-frequency stability and output energy with diode-pumped monolithic Nd:YVO₄ crystal, and achieve a single-longitudinal-mode Q-switched output with a single pulse energy of 0.9 mJ, a pulse width of 7.5 ns, and a line width of 0.95 pm by optimizing the extinction ratio of the non-reciprocal element, the gain area, the size of self-intersecting angle and other conditions. As far as reviewed, this is the maximum energy achieved by the current monolithic gain media, which can provide references for analyzing and optimizing the single-longitudinal mode oscillations to achieve stable non-reciprocal gain grating lasers.

Key words lasers; laser optics; solid-state laser; gain gratings; single-mode; grazing incidence

OCIS codes 140.3580; 050.7330; 140.3570; 140.3390

1 引 言

研究显示,在激光谐振腔内将两束相干光在增益介质中相互作用形成干涉场,产生空间烧孔现象,能形成全息增益光栅。已有的理论和实验证明,增益光栅具有自适应增益饱和、衍射效率高和频谱选择特性^[1]。基于增益光栅的自适应激光器具有能够补偿腔内畸变的自适应性、空间滤波特性和自调 Q

特性^[2-5],其中,采用非互易式结构的谐振腔由于能够补偿 π 的相移可以得到单纵模输出^[6]。

基于增益光栅的激光振荡器谐振腔可以在既无调 Q 元件(普克尔盒或声光调制器),也不需要外部信号同步控制,又不插入选模器件的条件下实现高光束质量、调 Q 脉冲的单频输出。这将大大提高脉冲调 Q 单频固体激光器的可靠性和抗干扰能力,同时具有结构简洁、体积小的优势。

收稿日期: 2018-04-03; 修回日期: 2018-04-24; 录用日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(61378023)、北京市自然科学基金(KZ201610005006,4174085)

* E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

在用 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质、采用掠入射式结构的非互易式激光谐振腔中, 2002 年 Thompson 等^[7]在二极管连续抽运的条件下实现了自启动的相位共轭输出; 次年, 其团队在振荡腔内加入像传递系统, 提高了自交叉光的匹配程度, 得到近衍射极限的单纵模输出^[8]。2007 年, Smith 等^[9]采用掠入射结构准连续抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 得到单脉冲能量为 0.6 mJ、脉宽为 2.7 ns、光束质量 $M^2 < 1.3$ 的调 Q 单纵模输出。用 Nd:YAG 作为增益介质, 1998 年 Sillard 等^[10]首次采用激光二极管 (LD) 抽运可饱和增益介质产生增益光栅, 系统采用三块增益介质, 每个 Nd:YAG 通过面阵 LD 抽运, 采用透镜导管会聚抽运光, 在自启动的模式下, 获得最大单脉冲能量为 5.5 mJ、脉宽为 20 ns 的单纵模输出。2012 年, Soulard 等^[11]采用两块增益介质在 LD 抽运的非互易式增益光栅振荡器中实现了脉冲能量为 100 mJ、脉宽为 10 ns、重复频率为 100 Hz、线宽为 56.6 pm 的单纵模脉冲输出。从已有的研究可以看出, 文献^[10-11]通过增加增益介质个数来实现大能量输出, 但是目前单块增益介质的输出脉冲

能量不高; 文献^[8-9]虽然得到了单纵模输出, 但其光栅发生了提前饱和, 输出的单纵模不稳定, 且能量降低, 说明输出能量和单纵模稳定性存在优化潜力。

本文采用掠入射结构, 在脉冲抽运的单块 Nd:YVO₄ 晶体中形成增益光栅以实现共轭输出, 实验过程中观察到, 在光栅提前饱和的情况下并不能得到稳定的单纵模输出, 且输出能量不高。分析影响输出能量和单频性的因素, 通过优化非互易式器件 (NRTE), 控制自交叉光的角度和光强大小, 以及增益区域的面积, 使自交叉光有更佳匹配程度。在自交叉光外部夹角为 31° 和 33°、抽运区域为 18 mm × 0.54 mm 条件下得到脉冲宽度为 7.5 ns、脉冲位于抽运时序后沿、抽运光功率为 1.08~1.42 W、对应的抽运光电流为 255~320 A、最大输出功率为 45.6 mW、单脉冲能量为 0.9 mJ、线宽为 0.95 pm 稳定的单纵模输出。

2 基本原理

两束相干光束在饱和增益介质中干涉形成空间烧孔是形成增益光栅的基本机制^[12-14], 其结构如图 1 所示。

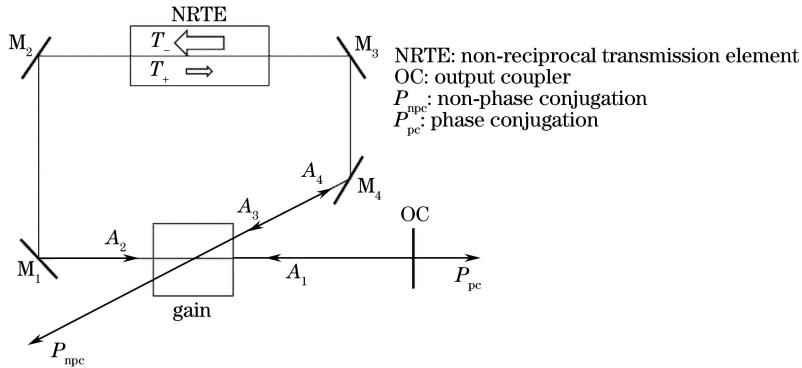


图 1 光束 A₁~A₄ 相交形成一个动态全息增益光栅的谐振腔结构示意图

Fig. 1 Schematic of resonant cavity of dynamic holographic gain gratings formed by intersection beams A₁-A₄

自发辐射光 A₁ 和 A₃ 相长干涉, 起始时在增益介质中形成微弱的透射光栅。A₄ 以逆时针方向在环内传播, 转换为 A₂ 和被输出耦合器 OC 反射的 A₁, 同时, A₁ 以顺时针方向在腔内传播, 转换为 A₃。在增益介质中能够发生相长干涉、引起增益光栅增长的光束将被优先选择、放大。这种参量反馈作用引起了增益光栅与光束的相互增长, 当往返增益大于 1 时, 逆时针的共轭光束起振, 达到阈值后得到共轭输出。由于增益光栅的饱和特性, 随着往返增益的增长, 光栅达到饱和后类似于可饱和吸收体迅速被漂白, 在谐振腔内不能形成有效的往返振荡, 从而使输出的共轭光具有了调 Q 脉冲的形式。增

益光栅的这种自适应的特性, 使其具有修正相位失真的功能。形成光栅的光束所携带的相位信息、热畸变等都会记录在增益介质中, 可得到克服畸变信息的共轭光输出, 从而改善光束质量。

要实现上述增益光栅的特性, 需要满足腔内振荡场的形成与环路边界条件, 要保持腔内振荡场和增益光栅的共同增长, 就要保证形成光栅的自交叉光的自洽性。其中, 在正向透过率 T₊ 和输出镜反射率 R_{oc} 都处在一个相对较低的值时, 共轭输出有最大值^[15], 可获得最大的输出能量和最佳的衍射效率。正向透过率由 NRTE 结构通过调节半波片角度来控制。NRTE 结构由起偏器 P1、半波片、法拉

第旋转器和检偏器 P2 共同组成,主要用于控制顺时针和逆时针传播光束的透射率,确保图 1 中沿逆时针方向的单向振荡和 A_3 的光强与 A_1 有更好的一致性,避免 A_3 光强过大导致增益介质内迅速饱和,以最大化利用抽运能量,提高输出效率,同时具有补偿 π 相移的作用。为了延迟增益光栅的增益饱和,通过调节半波片将 NRTE 的正向透射率控制在很小的值(约为 0.48%)。

3 实验结构

自启动激光振荡器结构如图 2(a) 所示,增益介质选择为掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:YVO₄。Nd:YVO₄ 晶体沿 a 轴切割,尺寸为 22 mm × 5 mm × 2 mm,板条晶体呈梯形,两侧切角为 13°,抑制寄生

振荡,掠入射结构为全反射,左右两侧镀有 1064 nm 增透膜,抽运面镀 808 nm 增透膜,在两个梯形面上分别加铜热沉进行冷却,如图 2(b) 所示。

抽运源采用峰值功率为 500 W、输出波长为 808 nm、重复频率为 50 Hz、脉宽为 90 μ s 的脉冲半导体巴条侧面抽运。通过焦距 $f=35$ mm 的柱透镜(VCL)对抽运光的竖直方向进行压缩,将入射到晶体表面的抽运光尺寸压缩为 15 mm × 0.54 mm。抽运光是横磁(TM)偏振光,且偏振方向平行于 Nd:YVO₄ 晶体的 c 轴,在此偏振方向上 Nd:YVO₄ 的吸收系数为 30 cm⁻¹,抽运吸收深度约为 330 μ m。输出镜透过率(T)设为 99.6%,确保腔内有很弱的自发辐射光作为信号光 A_1 ,以实现振荡器的自启动。

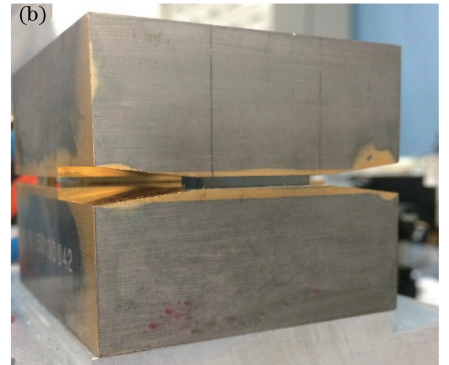
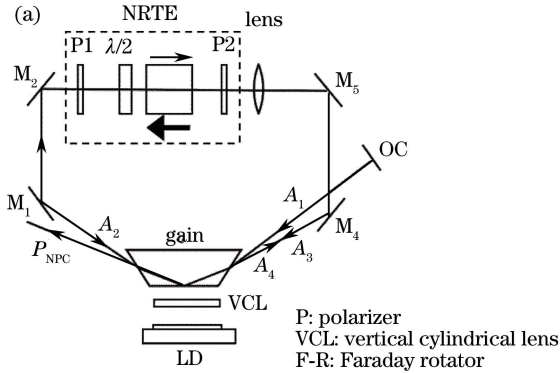


图 2 (a) 自启动激光器实验结构图; (b) 热沉图

Fig. 2 (a) Schematic of self-starting laser cavity; (b) heat sink

采用掠入射结构的优势在于,增益区域比较均匀,光在抽运面经过一次全反射能够充分利用增益区域内的增益,而且,经过一次全反射同样会补偿晶体内的热梯度分布,使晶体内的热量呈一维分布,从而提高光束质量,这种结构还能够提供很大的增益(约 10⁴)。整个环形腔的光学长度约为 800 mm,在腔内加入 $f=200$ mm 的圆透镜实像传递,使 A_3 与 A_1 光斑大小相匹配。

4 实验结果及分析

4.1 NRTE 结构中偏振器件的优化

实验中 A_1 、 A_3 外部角度为 32° 和 35°,晶体内部交叉角为 1.01°,抽运区域为 15 mm × 0.54 mm,抽运吸收深度为 330 μ m。首先,对不同消光比的偏振器件的输出进行对比。起始 NRTE 结构中采用消光比为 1000:1 的格兰棱镜,阈值处得到在抽运时序后沿的脉冲输出,脉宽为 14 ns,如图 3 所示。使输出脉冲

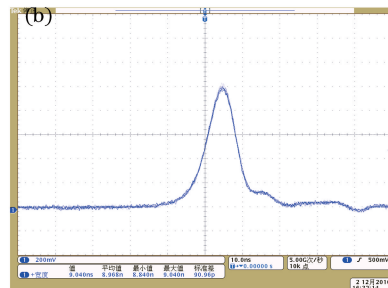
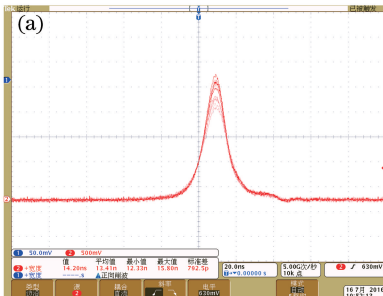


图 3 输出镜 $T=99.6\%$ 时的 (a) 输出脉宽和 (b) 脉冲时序

Fig. 3 (a) Output pulse width and (b) timing diagram when output mirror $T=99.6\%$

位于抽运后沿可以在保证高效率的同时增加光在腔内的循环振荡次数,充分利用抽运能量,使增益光栅带通滤波作用增强,保证调 Q 脉冲单频输出。通过调节半波片角度减小顺时针方向透过率 t_+ ,使 A_3 光与 A_1 光强度相似,保证增益光栅不会提前饱和、脉

冲时序不会前移。随着抽运功率增加,脉冲开始前移,通过旋转半波片减小顺时针方向的透过率,脉冲并未向抽运的后沿移动,如图 4(a)所示。在阈值附近时用法布里-珀罗(F-P)标准具测量了输出光的单频特性,从图 4(b)中可以看出,输出光并不是单纵模。

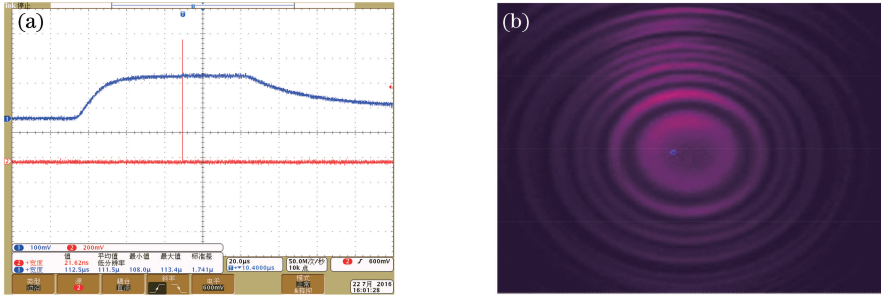


图 4 (a)高抽运功率下输出脉冲与抽运的时序图;(b) F-P 干涉图样

Fig. 4 (a) High pump power output pulse and pump timing diagram; (b) F-P interference ring

虽然得到了调 Q 脉冲输出,但由于 NRTE 结构无法保证透过率 T_+ 足够小,使 A_3 光较强,光栅提前饱和,导致脉冲提前输出。同时,光栅过早饱和也降低了其滤波能力,导致没有获得单纵模输出。分析影响 NRTE 结构性能的因素,除了器件增透膜的透过率之外,最重要的是 P1、P2 两个偏振器件的消光比。当偏振器件的消光比不高时,透过偏振片后的光夹杂其他偏振态光的强度就会比较大,此时无法通过调节半波片使顺时针传播的光强足够小,导致自交叉形成光栅的两束光的自洽程度降低。高消光比偏振器件对偏振光有着很强的分辨能力,能够最大限度地提高透射光的偏振程度。由于整个结构的精细程度增加,这样就能通过调节半波片角度控制顺时针传播光的透过率,使自交叉光的自洽程度大大提高。这样不仅提高了光栅的衍射效率、提高抽运的利用率,还能增强光栅的空间滤波特性。

将 NRTE 结构中偏振器件替换为具有更高消光比的 YVO_4 晶体材料的洛匈棱镜,与其他偏振器件不同的是,洛匈棱镜输出的两束光的偏振程度都非常高,消光比通常大于 10000:1,实验测得该消光比为 20000:1。对比两者的实验结果,在相同抽运区域和相同外加交叉角的条件下,脉冲位于抽运时序后沿时,抽运光功率为 0.74~0.95 W,对应的抽运光电流为 190~230 A,此时脉宽约 9 ns,最大输出功率为 25 mW,单脉冲能量为 0.5 mJ,如图 5 所示。用 F-P 标准具测量输出光的单频性,干涉条纹如图 6 所示。实验结果表明,通过高消光比的偏振器件来提高 NRTE 结构的精细程度,能够实现调 Q 单纵模输出,如图 6(a)所示。随着抽运功率增加,通过调节半波片能够保证输出脉冲处于抽运后沿,以保证抽运的利用率。但在实验过程中发现,单频性能不稳定,随着观测时间变长,会出现如图 6(b)所示的多套干涉环的情况。

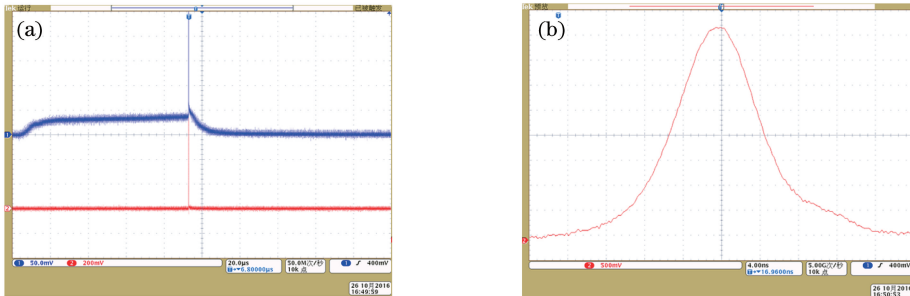


图 5 高抽运功率下输出脉冲与抽运的(a)时序图和(b)输出脉宽图

Fig. 5 Diagram of high pump power output pulse and pump (a) timing and (b) output pulse width

4.2 抽运区域和交叉角的优化

通过分析认为,由于抽运水平区域与自交叉光

在抽运面的展开程度匹配不佳,导致输出光并不是单纵模,且长时间观测时会出现两个纵模振荡的情

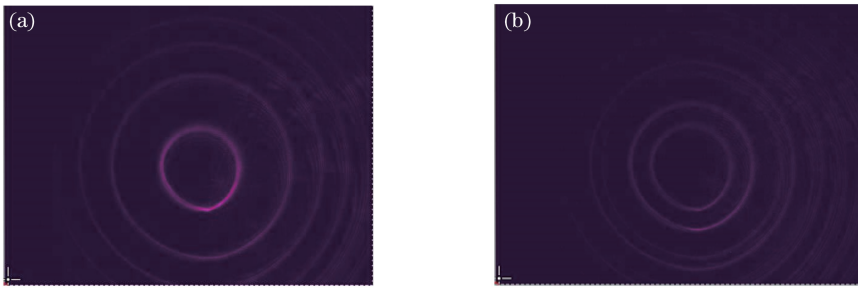


图 6 F-P 干涉图样随时间的变化。(a)短时间观测;(b)长时间观测

Fig. 6 F-P etalon interference pattern changed with time. (a) Short time observation; (b) long time observation

况。通过优化抽运区域来得到单频稳定、输出更高的脉冲输出。

展览抽运水平方向,使抽运区域为 $17\text{ mm} \times 0.54\text{ mm}$ 。当脉冲位于抽运时序后沿时,抽运光功率为 $0.90 \sim 1.32\text{ W}$,对应的抽运光电流为 $220 \sim 300\text{ A}$,此时激光输出脉宽为 $7 \sim 8\text{ ns}$,最大输出功率为 30.9 mW ,单脉冲能量为 0.618 mJ 。从结果可以看到,展览抽运区域确实能够获得更大的输出能量。F-P 标准具干涉图样如图 7 所示,同样会出现

不稳定现象,但观测到的稳定时间要比抽运光宽为 $15\text{ mm} \times 0.54\text{ mm}$ 时长,稳定度有所提高。

进一步将抽运光展览为 $18\text{ mm} \times 0.54\text{ mm}$,实验结果显示,当脉冲位于抽运后沿时,抽运光功率为 $1.08 \sim 1.52\text{ W}$,对应的抽运光电流为 $255 \sim 340\text{ A}$ 。此时最大功率为 35 mW ,单脉冲能量为 0.6 mJ ,脉宽仍为 $7 \sim 8\text{ ns}$,在充分利用抽运的条件下输出能量进一步得到提高。F-P 标准具干涉图样如图 8 所示,虽然仍出现不稳定现象,但稳定度得到进一步提高。

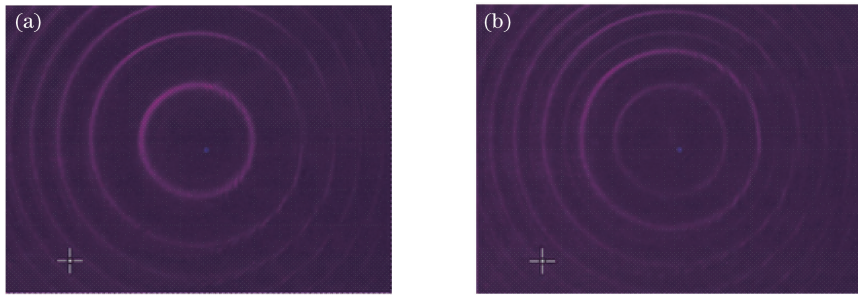


图 7 抽运区域为 $17\text{ mm} \times 0.54\text{ mm}$,F-P 干涉图样随时间的变化。(a)短时间观测;(b)长时间观测

Fig. 7 Pump area is $17\text{ mm} \times 0.54\text{ mm}$, F-P etalon interference pattern changed with time.

(a) Short time observation; (b) long time observation

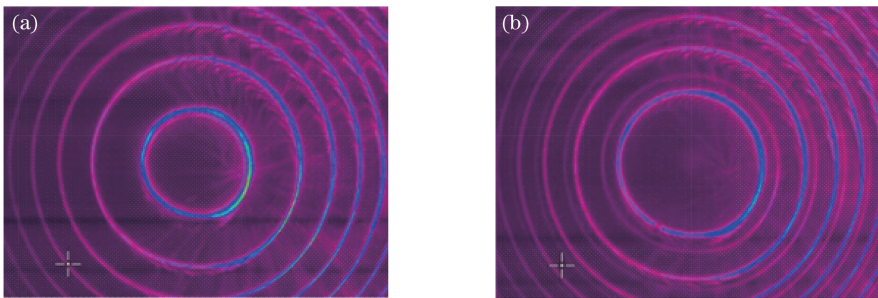


图 8 抽运区域为 $18\text{ mm} \times 0.54\text{ mm}$,F-P 干涉图样随时间的变化。(a)短时间观测;(b)长时间观测

Fig. 8 Pump area is $18\text{ mm} \times 0.54\text{ mm}$, F-P etalon interference pattern changed with time.

(a) Short time observation; (b) long time observation

由于晶体抽运面长度约为 19.5 mm ,为了保护实验器件的安全,使抽运范围与增益光栅范围有更好的匹配,提高频率稳定性和输出功率,尝试通过减小自交叉光的交叉角来实现。将 A_1 和 A_3 的

角度调整为 31° 和 33° ,晶体内部交叉角为 0.7° 。实验结果显示,脉冲位于抽运时序后沿时,抽运光功率为 $1.08 \sim 1.42\text{ W}$,对应的抽运光电流为 $255 \sim 320\text{ A}$ 。此时脉冲宽度为 7.5 ns ,如图 9(a)所示,

最大输出功率能达到 45.6 mW,单脉冲能量为 0.91 mJ。此条件下,F-P 标准具干涉图样如

图 9(b)所示,输出稳定性较高的单频,没有出现两个纵模振荡的情况。

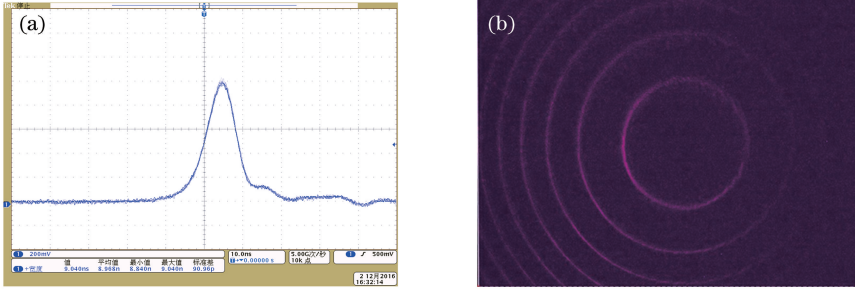


图 9 (a)自启动时输出脉宽图;(b)自启动时 F-P 干涉图样

Fig. 9 (a) Output pulse width of self-starting laser; (b) F-P interference pattern of self-starting laser

由上述对比实验结果可知,当 A_1 、 A_3 角度分别为 31° 和 33° ,抽运区域为 $18 \text{ mm} \times 0.54 \text{ mm}$ 时,可以得到最佳的输出效果,单频输出稳定,输出功率为 45.6 mW,单脉冲能量达到 0.91 mJ。实验中 F-P 标准具表面反射率为 94%,自由光谱范围(R_{fs})为 10 pm,分辨率为 0.2 pm,直径为 20 mm。根据简单的线宽计算公式:

$$\frac{d\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\Delta l}{\Delta L}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为相邻两干涉条纹间隔。经过 CCD 测量软件 BeamGage 测得中心干涉环的厚度为 0.119 mm,相邻两干涉条纹间隔 1.253 mm,由(1)式可计算出线宽 $d\lambda$ 约为 0.95 pm。

5 结 论

在掠入射结构脉冲抽运单块增益介质非互易式激光谐振腔中,分析了影响输出能量和单频性的因素,通过比较 NRTE 结构中不同消光比的偏振器件、优化抽运区域大小和自交叉光的夹角来提高输出的能量和单频的稳定性,最终得到脉宽为 7.5 ns、单脉冲能量为 0.91 mJ、线宽约为 0.95 pm 的稳定的单纵模输出。通过增益光栅得到稳定的自适应自调 Q 稳定的单频输出,为下一步利用增益光栅的自适应特性,实现外部单频种子注入下的稳频输出打下了良好的基础。

参 考 文 献

[1] Green R P M, Crofts G J, Damzen M J. Phase conjugate reflectivity and diffraction efficiency of gain gratings in Nd:YAG[J]. Optics Communications, 1993, 102(3/4): 288-292.
 [2] Minassian A, Crofts G J, Damzen M J. A tunable self-pumped phase-conjugate laser using Ti:sapphire

slab amplifiers[J]. Optics Communications, 1999, 161(4/5/6): 338-344.
 [3] Tomita A. Phase conjugation using gain saturation of a Nd:YAG laser[J]. Applied Physics Letters, 1979, 34(7): 463-464.
 [4] Green R P M, Crofts G J, Damzen M J. Holographic laser resonators in Nd:YAG[J]. Optics Letters, 1994, 19(6): 393-395.
 [5] Damzen M J, Green R P M, Syed K S. Self-adaptive solid-state laser oscillator formed by dynamic gain-grating holograms[J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1704.
 [6] Wittler O, Udaiyan D, Crofts G J, et al. Characterization of a distortion-corrected Nd:YAG laser with a self-conjugating loop geometry[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(4): 656-664.
 [7] Thompson B A, Minassian A, Eason R W, et al. Efficient operation of a solid-state adaptive laser oscillator[J]. Applied Optics, 2002, 41(27): 5638-5644.
 [8] Thompson B A, Minassian A, Damzen M J. Operation of a 33-W, continuous-wave, self-adaptive, solid-state laser oscillator[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2003, 20(5): 857-862.
 [9] Smith G, Damzen M J. Quasi-CW diode-pumped self-starting adaptive laser with self-Q-switched output[J]. Optics Express, 2007, 15(10): 6458-6463.
 [10] Sillard P, Brignon A, Huignard J P, et al. Self-pumped phase-conjugate diode-pumped Nd:YAG loop resonator[J]. Optics Letters, 1998, 23(14): 1093-1095.
 [11] Soulard R, Brignon A, Raby S, et al. Diode-pumped Nd:YAG self-adaptive resonator with a high-gain amplifier operating at 100 Hz[J]. Applied Physics B,

- 2012, 106(2): 295-300.
- [12] Damzen M J, Green R P M, Crofts G J. High-reflectivity four-wave mixing by gain saturation of nanosecond and microsecond radiation in Nd:YAG[J]. Optics Letters, 1992, 17(19): 1331-1333.
- [13] Crofts G J, Green R P, Damzen M J. Investigation of multipass geometries for efficient degenerate four-wave mixing in Nd:YAG. [J]. Optics Letters, 1992, 17(13): 920-922.
- [14] Brignon A, Raffy J, Huignard J P. Transient degenerate four-wave mixing in a saturable Nd:YAG amplifier: the effect of pump-beam propagation [J]. Optics Letters, 1994, 19(12): 865-867.
- [15] Crofts G J, Damzen M J. Numerical modelling of continuous-wave holographic laser oscillators [J]. Optics Communications, 2000, 175(4): 397-408.