

# 基于增益光栅的注入锁定单频自调 Q 激光器

许云鹏<sup>\*\*</sup>, 吴婷, 李之通, 姜梦华, 惠勇凌, 雷甬, 李强<sup>\*</sup>

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 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。通过四波混频作用形成的增益光栅具有自适应性、自调 Q 性和空间滤波能力, 能够得到全息的共轭输出。但其都起始于腔内的自发辐射, 自发辐射容易受到抽运的影响, 而且带宽很宽, 导致输出的频率会有一定的波动。实验可知, 在基于增益光栅的自启动单频调 Q 激光器中, 采用外部注入单频窄线宽的种子源引导形成增益光栅, 可获得锁定在种子光频谱范围内的稳定的单频调 Q 脉冲输出。对比实验发现, 在相同的观察时间内, 注入种子源输出的频谱稳定程度远高于自启动输出的频谱稳定程度。这一现象也证明了通过外部种子注入形成光栅, 利用增益光栅的自适应性能够得到稳频输出。

**关键词** 激光器; 固体激光器; 注入锁定频率; 单纵模; 增益光栅

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0914002

## Injection Locked Single Frequency Self-Q-Switched Lasers Based on Gain Gratings

Xu Yunpeng<sup>\*\*</sup>, Wu Ting, Li Zhitong, Jiang Menghua, Hui Yongling, Lei Hong, Li Qiang<sup>\*</sup>

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

**Abstract** The interference of space beam in gain medium generates space burning hole phenomenon, and forms the gain grating. The gain grating formed by the four-wave mixing function has adaptive, self-tuning Q and spatial filtering capability, and can obtain holographic conjugate output. But all of them start from the spontaneous emission in the cavity. Spontaneous emission is easily influenced by the pump, and its bandwidth is wide, which will cause a certain fluctuation in the output frequency. In this paper, a single-frequency Q-switched pulse output locked in the seed spectrum range is obtained by an external single-frequency narrow linewidth source injection in a self-starting single-frequency laser based on a gain grating. Comparative experiment shows that in the same observation time, the spectral stability of the injected output is much higher than the self-starting output. This phenomenon also proves that the steady frequency output can be obtained by the adaptability of the gain grating formed by external seed injection.

**Key words** lasers; solid-state lasers; injection-locked frequency; single longitudinal mode; gain gratings

**OCIS codes** 140.3580; 140.3520; 140.3570; 050.7330

## 1 引 言

激光雷达<sup>[1]</sup>、高分辨率光谱检测<sup>[2]</sup>、相干激光通信<sup>[3]</sup>、光学测量<sup>[4]</sup>等应用对激光器输出频率稳定性有着严格要求。但是普通的单纵模激光器几乎不能保证长期的频率稳定。例如, 在多普勒风激光雷达中应用的激光器的频移应该在兆赫兹范围<sup>[5]</sup>。因此, 频率稳定激光器的研究已经成为热点。

最近的研究发现, 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。通过四波

混频(FWM)作用形成的增益光栅具有自适应性、自调 Q 性、窄化带宽和空间滤波能力, 能够得到全息的共轭输出<sup>[6-10]</sup>。Sillard 等<sup>[11]</sup>采用非互易式自适应增益光栅环形激光振荡器, 获得了 13 ns 脉宽的调 Q 单纵模脉冲输出。Smith 等<sup>[12]</sup>采用非互易式掠入射结构连续抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 得到了光束质量  $M^2 < 1.3$ 、单脉冲能量为 0.6 mJ、脉宽为 2.7 ns 的单纵模输出。Soulard 等<sup>[13]</sup>采用二极管抽运的陶瓷 Nd:YAG 放大器, 用增益光栅非互易透射环形激光振荡器结构获得了脉冲能量为 100 mJ、

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-04-23

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; \*\* E-mail: xyp15510331803@163.com

脉冲重复频率为 100 Hz、近衍射极限的单纵模激光输出。上述的增益光栅激光器,虽然可得到单纵模的脉冲输出,但都起始于腔内的自发辐射,容易受到抽运的影响,而且其带宽很宽。腔内振荡得到单纵模输出的过程中,增益介质热效应、机械振动等引起腔长的变化导致输出的频率会有一定的波动。分析已有的研究结果,利用增益光栅的注入锁定未进行实验研究<sup>[14]</sup>。利用种子光引导形成增益光栅实现稳频的输出还没有相关的实验报道。

本文介绍了一种二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 掠入射结构注入锁定自调 Q 单频激光器。在实验中成功证明了在增益介质中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;将外部一束单频光注入环路,使腔内振荡光起始于注入光束,引导介质内的增益光栅起始于注入光束,由于起始光束带宽很窄,能够将振荡光限制在注入光束的带宽范围内,从而极大地减小输出光频率的随机性,实现注入频率的锁定。证明了利用增益光栅的自适应性,采用无反馈控制的注入结构能够实现稳频输出。

## 2 基本原理

两束相干光束在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<sup>[15-17]</sup>。形成光栅的自交叉作用的光全部起始于腔内高增益介质的自发辐射。如图 1 所示,自发辐射光 A<sub>1</sub> 和 A<sub>3</sub> 发生相长干涉,起始时在增益介质中形成微弱的透射光栅。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,然后在谐振腔内不能形成有效的往返振荡,从而使输出光具有了调 Q 脉冲的形式。其中非互易式元件(NRTE)由起偏器 P<sub>1</sub>、半波片、法拉第旋转器(F-R)和检偏器 P<sub>2</sub> 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,确保沿逆时针方向的单向振荡和 A<sub>3</sub> 光的光强与 A<sub>1</sub> 有更好的一致性,同时具有调节衍射效率和补偿 π 相移的作用。

Minassian 等<sup>[18]</sup>发现在介质内通过简并的四波混频原理形成的自适应增益全息激光振荡器(HLO)具有频谱滤波和演化的特性。在文献<sup>[19]</sup>中证明了在相互作用的四波场中对带宽有窄化作

用。当增益光栅由单色辐射写入或者从宽带辐射启动时,这种全息激光振荡器的输出可以演化为单纵模,与增益光栅的数值模拟相对应。所产生的输出辐射的带宽 Δν<sub>out</sub> 是体积增益光栅的输入辐射带宽 Δν<sub>in</sub> 和滤波器带宽 Δν<sub>G</sub> 的函数<sup>[18]</sup>,三者满足

$$\frac{1}{\Delta\nu_{out}^2} = \frac{1}{\Delta\nu_G^2} + \frac{1}{\Delta\nu_{in}^2} \quad (1)$$

Δν<sub>G</sub> 是放大器长度 L 的函数,可表示为<sup>[12]</sup>

$$\Delta\nu_G = \frac{1}{2L/c} \quad (2)$$

式中:c 为真空中光速。因此,当放大器长度 L 给定时,输出带宽 Δν<sub>out</sub> 仅取决于输入带宽 Δν<sub>in</sub>。

## 3 实验结构及结果分析

在利用增益光栅自适应性通过外部种子注入实现注入频率锁定之前,采用如图 1 所示结构实现基于增益光栅的自启动单纵模脉冲输出。自启动腔中,增益介质选择为掺杂 Nd 原子数分数为 1% 的 Nd:YVO<sub>4</sub>。Nd:YVO<sub>4</sub> 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°,以抑制寄生振荡;掠入射结构为全反射,左右两侧通光面镀有 1064 nm 增透膜,晶体下侧面镀有 808 nm 增透膜,为抽运光通光面,在两个梯形面上分别加铜热沉进行冷却。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 μs 的脉冲半导体巴条侧面抽运。通过焦距 f 为 35 mm 的柱透镜(VCL)对抽运光的垂直方向进行压缩,将入射到晶体表面的抽运光尺寸压缩为 18 mm×0.54 mm。抽运光是 TM 偏振光且偏振方向平行于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的 c 轴,在此偏振方向上 Nd:YVO<sub>4</sub> 的吸收系数为 30 cm<sup>-1</sup>,抽运吸收深度约为 330 μm。输出镜透射率 T=99.6%,确保腔内有

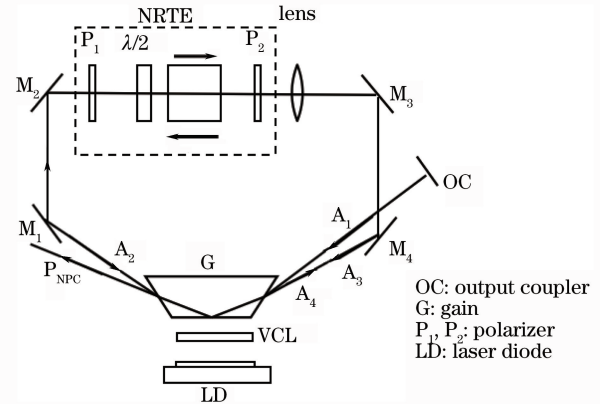


图 1 自启动激光器结构图

Fig. 1 Schematic of the self-starting laser

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。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后能够充分利用增益区域内的增益; 经过一次全反射同样会补偿晶体内部热梯度分布, 使晶体内部的热分布呈一维分布, 以提高光束质量; 这种结构能够提供很大的增益 (约  $10^4$ )。整个环形腔的光学长度约为 800 mm, 在腔内加入焦距为 200 mm 的圆透镜实现传递, 使  $A_3$  与  $A_1$  光斑大小相匹配。

在自交叉光外部夹角为  $31^\circ$  和  $33^\circ$ 、抽运区域为  $18 \text{ mm} \times 0.54 \text{ mm}$  的条件下, 得到如图 2(a) 所示的单纵模输出脉冲, 脉冲宽度为 8 ns, 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  $255 \sim 320 \text{ A}$ , 最大输出功率为  $45.6 \text{ mW}$ , 单脉冲能量为  $0.9 \text{ mJ}$ 。利用法布里-珀罗 (F-P) 标准具测量激光单频特性, 得到的 F-P 标准具干涉图样如图 2(b) 所示, 输出单频性稳定, 没有出现两个纵模振荡的情况。实验中 F-P 标准具表面反射率为  $94\%$ , 自由光谱范围 ( $R_{fs}$ ) 为  $10 \text{ pm}$ , 分辨率为  $0.2 \text{ pm}$ , 直径为  $20 \text{ mm}$ 。线宽的计算公式可表示为

$$\frac{d\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\Delta l}{\Delta L}, \quad (3)$$

式中:  $d\lambda$  为线宽;  $\Delta\lambda$  为标准具的自由光谱区范围;  $\Delta l$  为中心干涉环的厚度;  $\Delta L$  为相邻两干涉条纹间隔。利用电荷耦合元件 (CCD) 测量软件 BeamGage 测得中心干涉环的厚度为  $0.119 \text{ mm}$ , 相邻两干涉条纹间隔为  $1.253 \text{ mm}$ , 通过 (3) 式可计算出线宽  $d\lambda$  约为  $0.95 \text{ pm}$ 。

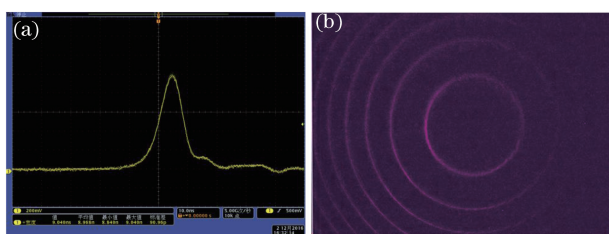


图 2 (a) 自启动激光器的输出脉宽图;

(b) 自启动激光器的 F-P 干涉图样

Fig. 2 (a) Output pulse width of the self-starting laser;

(b) F-P interference pattern of the self-starting laser

在注入种子光之前, 首先考虑在自启动激光器中, 腔内自发辐射  $A_1$  经过环路形成  $A_3$ , 然后在晶体内部自交叉形成光栅, 满足振荡条件后得到激光输出, 得到的输出光是  $A_1$  的共轭光, 因此外部注入的种子光必须是形成光栅最起始的光。因此选择种子光沿着  $A_1$  方向注入, 实验结构如图 3 所示。

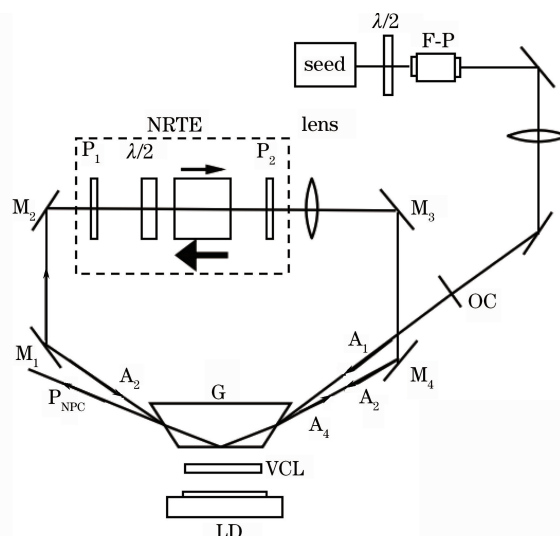


图 3 种子光注入激光器结构图

Fig. 3 Schematic of the laser with seed light injection

实验中单频种子源采用增益介质为  $\text{Nd:YVO}_4$  的连续激光器, 该激光器的最大输出功率为  $100 \text{ mW}$ , 种子光为水平偏振, 偏振度为  $100:1$ , 光束质量  $M^2 < 1.1$ , 输出中心波长为  $1064.31 \text{ nm}$ , 其光谱如图 4 所示。Nd:YVO<sub>4</sub> 单频种子光通过一个法拉第隔离器, 然后进入自启动环路中, 原环路中的输出光在经过隔离器后偏振态会旋转  $90^\circ$  并从另一个方向的逃逸窗口射出, 这样保证了在系统运转过程中不会有反馈光对种子源产生影响。在法拉第隔离器后加入透镜对种子光进行压缩, 使之与增益区域匹配。

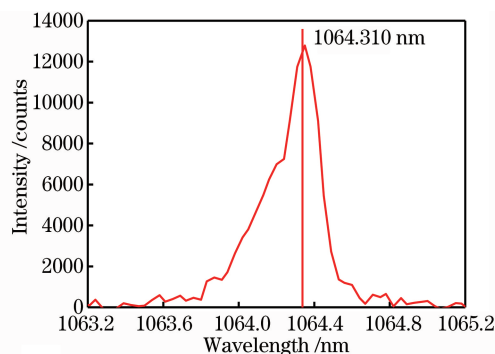


图 4 单频种子源光谱图

Fig. 4 Spectrum of single frequency seed source

在低于自启动阈值电流的条件下, 外部单频种子光注入环路, 注入种子光功率为  $25 \text{ mW}$ , 得到了共轭输出, 其频谱如图 5 所示, 中心波长为  $1064.135 \text{ nm}$ , 将输出光谱与种子光的光谱进行对比, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 在有单频种子注入时, 虽然输出光的中心波长与种子光的中心波长并没有重合, 但是输出光的中心波长在种子光的



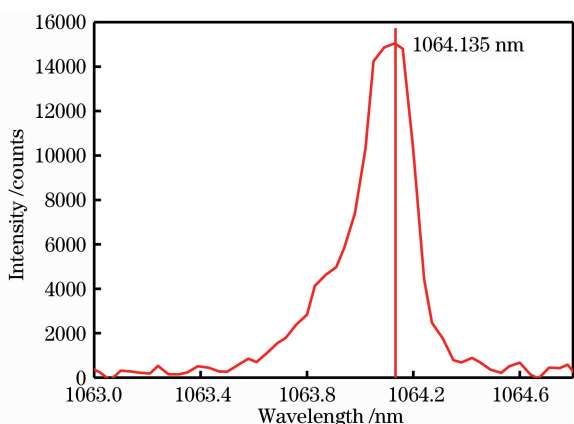


图 5 有种子光注入时激光器的输出光谱图

Fig. 5 Output spectrum of the laser with seed light injection

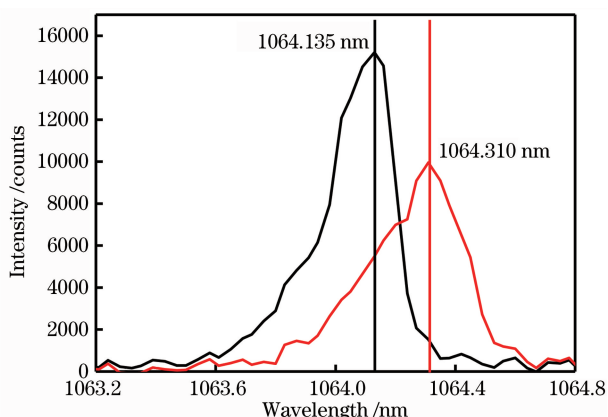


图 6 有种子光注入时激光器的输出光谱与种子光谱的对比

Fig. 6 Comparison of output spectrum of the laser with seed light injection and seed light spectrum

光谱范围内,这就说明通过外部单频种子光注入在晶体内部形成了增益光栅,利用增益光栅的自适应特性,实现了在种子光频谱范围内的锁定。用 F-P 标准具测量输出光的单频性,其 F-P 干涉条纹和脉冲宽度如图 7 所示。此时脉冲位于抽运时序后沿时抽运光功率为 1.0~1.32 W,对应的抽运光电流为 240~300 A,最大输出功率为 40.3 mW。由于在外部注入单频种子光后,增益光栅的形成不再起始于腔内的自发辐射噪声,而是起始于注入的种子光,种子光功率远大于自发辐射噪声,达到光栅饱和强度时光束在腔内的振荡次数少于起始于自发辐射噪声时光束在腔内的振荡次数,抽运光能量并未完全利用,Q 开关时间变慢;且实验中由于注入种子光的中心波长与自启动时最大增益处的输出波长有差异,增益有所降低,输出的脉冲峰值功率下降。因此在抽运能量一定的条件下,增益光栅饱和能量是一定的,导致输出脉宽有所展宽。输出激光脉宽为 24.3 ns,如图 7(a)所示。输出激光的 F-P 干涉图样

为一套稳定的干涉环,如图 7(b)所示。

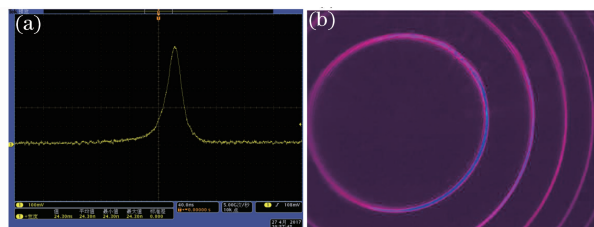


图 7 (a) 有种子光注入时激光器的输出脉宽图;  
(b) 有种子光注入时激光器的 F-P 干涉图样

Fig. 7 (a) Output pulse width of the laser with seed light injection; (b) F-P interference pattern of the laser with seed light injection

从上面的实验结果中可以看出,通过外部注入单频种子光,并引导其在晶体内部形成光栅,利用增益光栅的特性能够实现输出频率的锁定。对比了种子注入输出和自启动输出的光谱,如图 8 所示。自启动输出光谱中心波长在 1064.078 nm 附近波动,种子注入输出光谱中心波长稳定在 1064.135 nm 处。从图 8 中可以看出,有外部注入时输出的中心波长与自启动时的输出波长相比更靠近种子光的中心波长,这说明有种子注入时输出波长将自启动时的中心波长向种子光中心波长方向拉动,同时也证明了利用增益光栅实现稳频输出的可行性。为了避免偶然性,对自启动输出的光谱和注入输出的光谱进行了多次测量,结果如图 9 所示。从图 9(a)可见,自启动输出的光谱中心波长在 1064.07~1064.1 nm 范围内波动,不稳定而且波动较大。而从图 9(b)可见,在相同的观察时间内,注入输出的光谱中心波长几乎稳定在 1064.135 nm 附近,在外部注入时实现

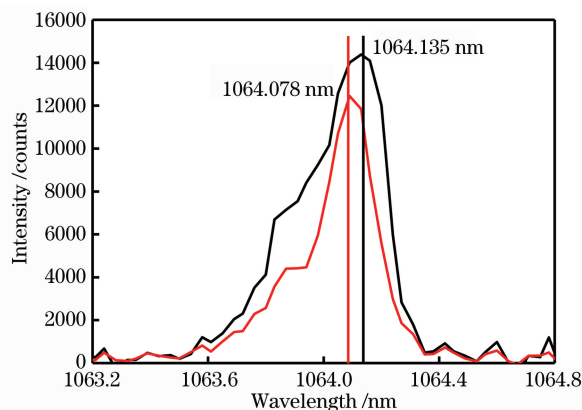


图 8 有种子光注入时的激光器与自启动激光器的输出光谱对比图

Fig. 8 Comparison of the output spectrum of the laser with seed light injection and the output spectrum of the self-starting laser

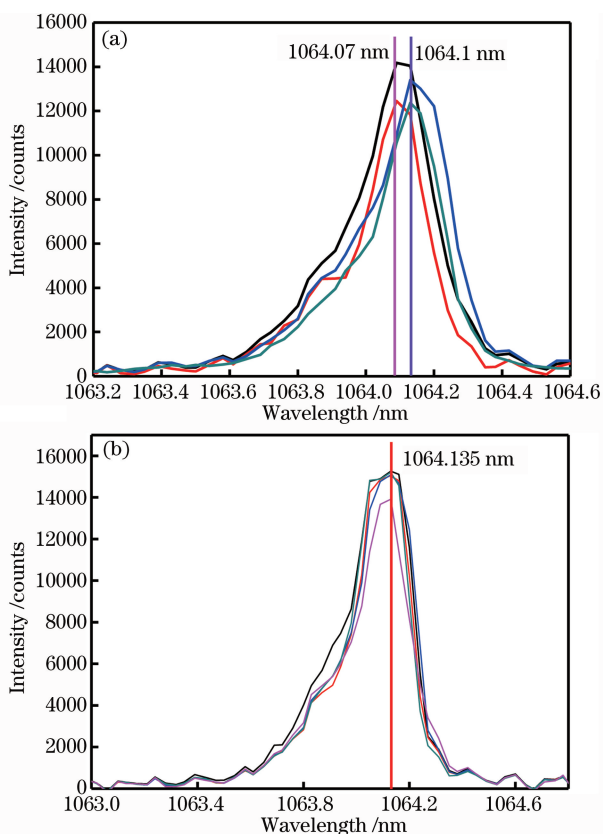


图9 多次测量的输出光谱图。(a)自启动激光器；  
(b)有种子光注入时的激光器

Fig. 9 Output spectra of multiple measurements.

(a) Self-starting laser; (b) laser with seed light injection

了频率的锁定。该结果进一步证明了利用增益光栅实现稳频输出的可行性。

从图6中可以看出,输出光谱的中心波长出现在种子光谱范围内,而输出光谱与注入的种子光谱没有完全重合,分析认为在此环形腔中,由于增益的限制,在1064.135 nm附近增益最强,导致在有外部注入时环形腔输出的中心波长被限制在此波长附近,虽然将中心波长向种子光的中心波长拉动,但由于增益强弱的制约,输出光的中心波长并不能与种子光的中心波长完全重合。

## 4 结 论

在自启动增益光栅单频脉冲激光器的基础上,通过外部注入单频窄线宽种子源,对比有种子注入时输出激光的中心波长和自启动时输出激光的中心波长,发现有注入时输出激光的中心波长更接近注入单频光的中心波长;而且在相同的观察时间内,有注入时输出光谱中心波长的波动明显小于自启动时输出光谱中心波长的波动。实现了输出的注入锁定,证明了利用增益光栅实现稳频输出的可行性。

使有注入时输出光谱的中心波长与种子光的中心波长完全重合以达到稳频输出是下一步的实验目标。

## 参 考 文 献

- [1] Liu J Q, Bu L B, Zhou J, *et al.* Optical frequency discriminator of a mobile direct-detection Doppler wind lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(10): 1339-1344.  
刘继桥, 卜令兵, 周军, 等. 车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1339-1344.
- [2] Nosu K. Advanced coherent lightwave technologies [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 26(2): 15-21.
- [3] Wieman C E, Hollberg L. Using diode laser for atomic physics[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(1): 1-20.
- [4] Goldsmith J E M, Weber E W, Hänsch T W. New measurement of the Rydberg constant using polarization spectroscopy of  $H_{\alpha}$ [J]. Physical Review Letters, 1978, 68(41): 1525-1528.
- [5] Nicklaus K, Morasch V, Hofer M, *et al.* Frequency stabilization of Q-switched Nd:YAG oscillators for airborne and spaceborne LIDAR systems [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6451: 64511L.
- [6] Tomita A. Phase conjugation using gain saturation of a Nd:YAG laser[J]. Applied Physics Letters, 1979, 34(7): 463-464.
- [7] Damzen M J, Green R, Crofts G J. Reflectivity and oscillation conditions of a gain medium in a self-conjugating loop geometry[J]. Optics Letters, 1994, 19(1): 34-36.
- [8] Syed K S, Green R P M, Crofts G J, *et al.* Transient modeling of pulsed phase conjugation experiments in a saturable Nd:YAG amplifier [J]. Optics Communications, 1994, 112(3/4): 175-180.
- [9] 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): 1704-1706.
- [10] Green R P, Udaiyan D, Crofts G J, *et al.* Holographic laser oscillator which adaptively corrects for polarization and phase distortions [J]. Physical Review Letters, 1996, 77(17): 3533-3536.
- [11] Sillard P, Brignon A, Huignard J P. Gain-grating analysis of a self-starting self-pumped phase-conjugate Nd:YAG loop resonator[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 34(3): 465-472.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Richard S, Brignon A. Self-injection locking of a self-adaptive loop resonator[C]//2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, June 17-22, 2007, Munich, Germany. New York: IEEE, 2007: 9812066.
- [15] 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.
- [16] Damzen M J, Green R P, 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.
- [17] 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.
- [18] Minassian A, Crofts G J, Damzen M J. Spectral filtering of gain gratings and spectral evolution of holographic laser oscillators[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 36(7): 802-809.
- [19] Vemuri G, Agarwal G S, Roy R, *et al.* Four-wave mixing with time-delayed correlated fields of arbitrary bandwidths and pump intensities[J]. *Physical Review A*, 1991, 44(9): 6009-6016.