

基于现场可编程门阵列的脉冲单纵模激光器 能量稳定控制技术

张 雪^{1,2,3}, 葛文琦^{1,2,4}, 余 锦^{1,2,3}, 刘殿敏⁵, 常 慧^{1,2,3}, 樊仲维^{1,2,3*}

¹中国科学院光电研究院半导体泵浦激光工程中心, 北京 100094;

²国家半导体泵浦激光工程技术研究中心, 北京 100094;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴中科和光(天津)应用激光技术研究所有限公司, 天津 300304;

⁵北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 102211

摘要 采用法布里-珀罗(F-P)标准具选模的脉冲单纵模激光器虽具有结构简单紧凑以及波长可调谐的特点,但存在输出能量对腔长变化敏感、长期稳定性差等问题。针对这些问题并根据 F-P 标准具产生单纵模激光的工作原理,分析了影响此类激光器输出能量稳定性的主要因素,得到了频率、谐振腔长与输出激光能量之间的关系,提出了动态反馈控制腔长的能量稳定控制方法,设计了基于现场可编程门阵列的高速数字电路能量稳定系统。利用所提控制方法对谐振腔长进行周期性调制,采用光电二极管探测纳秒脉冲激光信号的强度。腔长调制引起的纵模频率变化直接影响输出激光信号的强度,通过分析激光强度变化的信息,计算腔长失谐量,以此为依据进行实时的腔长补偿,从而形成闭环控制系统,实现单纵模激光的长期稳定输出。实验结果表明,采用所提控制系统时,纳秒脉冲单纵模激光器能量稳定性得到显著提高,连续工作 3 h 的能量不稳定性达到 1.3%。

关键词 激光器; 单纵模; 能量稳定性; 现场可编程门阵列; 法布里-珀罗标准具

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0801012

Energy Stability Control Technique for Pulsed Single-Longitude-Mode Laser Based on Field Programmable Gate Array

Zhang Xue^{1,2,3}, Ge Wenqi^{1,2,4}, Yu Jin^{1,2,3}, Liu Dianmin⁵, Chang Hui^{1,2,3}, Fan Zhongwei^{1,2,3}

¹Diode-Pumped Laser Engineering Center, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²National Engineering Research Center for DPSSL, Beijing 100094, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Hargio Applied Laser Technology Institute Company Limited, Tianjin 300304, China;

⁵Beijing GK Laser Technology Co. Ltd., Beijing 102211, China

Abstract A pulsed single-longitude-mode laser which uses a Fabry-Perot (F-P) etalon to select mode has advantages of simple compact structure and tunable wavelength. However, the output energy of the laser is

收稿日期: 2017-03-16; 收到修改稿日期: 2017-04-27

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)、中国科学院光电研究院创新项目(Y30B16A13Y)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(2014RA4051)

作者简介: 张 雪(1983—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: zhangxue@aoe.ac.cn

导师简介: 余 锦(1971—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事全固态激光技术方面的研究。

E-mail: jinyu@aoe.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn

sensitive to the change of cavity length, and the long-term stability is poor. To solve these problem, the main factors affecting the stability of output energy are analyzed based on the principle of single-longitude-mode laser with F-P etalon. The relationship among frequency, resonant cavity length and energy of output laser is obtained. An energy stability control method of dynamic feedback control cavity length is proposed. A high-speed digital circuit energy stabilization system based on field programmable gate array (FPGA) is designed. The length of resonant cavity is controlled periodically with the proposed method, and the intensity of the nanosecond pulsed laser signal is detected by photodiode. The frequency variation of longitudinal caused by the cavity length modulation directly affects the intensity of the output laser signal. The information of laser intensity change is analyzed, and the cavity length detuning is calculated. Based on this, the cavity length compensation is realized and a closed-loop control system is formed. Finally, the long-term stable output of the single-longitude-mode laser is achieved. Experimental results show that energy stability of the nanosecond pulsed single-longitude-mode laser is significantly improved with the proposed control system. The energy instability of continuous working for 3 h is 1.3%.

Key words lasers; single-longitude-mode; energy stability; field programmable gate array; Fabry-Perot etalon

OCIS codes 140.3538; 140.3570; 140.3425

1 引 言

全固态纳秒级脉冲单纵模激光器具有时间波形光滑、线宽窄、相干性好、能量集中以及光束质量好等优势,同时也是高能量激光系统中常用的种子光源,在精密测量、激光雷达、高分辨率光谱学等方面有广泛的应用,其输出能量、频率等指标的稳定性在实际应用中至关重要。目前国内外采用的稳定性控制技术主要分为主动控制技术及被动控制技术。主动控制技术主要通过鉴别激光频率的漂移获得误差信号,将误差信号作为控制信号,经伺服控制系统来稳定激光的频率。被动控制技术主要通过稳定抽运源电流、温度控制等方式提高激光器的稳定度^[1-3]。近年来,国内外的研究者对基于原子分子吸收谱线稳频^[4-5]和 Pound-Drever-Hall (PDH)稳频技术^[6-10]的稳频方法进行了大量研究。基于原子分子吸收谱线稳频的技术是将被控激光器频率与基准频率的偏差值作为反馈控制量,实现对激光频率的锁定控制,稳频精度较高,但谱线的频率覆盖范围有限^[11]。PDH 稳频技术利用法布里-珀罗(F-P)共焦腔进行鉴频稳频,具有较宽的调谐区域,但 F-P 腔的引入增大了系统的体积及调试难度,且使系统对环境干扰比较敏感,在一定程度上限制了系统的实际应用^[12]。

上述研究多针对连续单频激光的稳频控制,而单纵模纳秒脉冲激光的信号采集和运算速度与连续激光相比更为复杂,对模数(A/D)光电采样提出了更高的要求。现场可编程门阵列(FPGA)是高速数字信号处理的数字芯片,可针对高速数字信号进行复杂运算^[13-14]。本文基于 FPGA 数字电路,提出了实时反馈控制谐振腔和稳定激光器能量的方法,即采用光电(PD)探测器对激光器输出信号进行高速实时采集。通过处理器判断峰值能量位置的偏移,为反馈提供依据,同时通过压电陶瓷(PZT)控制谐振腔的长度,形成闭环控制系统,使激光器始终工作在纵模频率与滤波器匹配的状态下,并使能量稳定在最大值附近,从而实现了输出能量为 10 μ J、脉冲宽度为 30 ns 的单纵模运转,且连续工作 3 h 的能量不稳定性(相对标准差)达到 1.3%。

2 单纵模激光器选模原理及系统构成

2.1 标准具选模原理

激光器中某一个纵模能否起振和维持振荡主要取决于该纵模的增益与损耗值的相对大小,因此控制这两个参数之一,使谐振腔纵模中只有一个满足振荡条件,则可实现单纵模运转。采用 F-P 标准具产生单纵模激光输出,该方法通过增大各纵模间的净增益差异来达到纵模选择的目的。采用 F-P 标准具选模的脉冲单纵模激光器具有结构简单紧凑和波长可控的特点,其选模原理为:在腔内插入特定参数的 F-P 标准具,由于存在多光束干涉,只有某个特定频率的纵模具有较小的损耗,该频率的光能够透过标准具在腔内往返传播,其他频率的光因具有较大的损耗而无法起振。F-P 标准具对不同波长的光束具有不同的透过率 $T(\lambda)$, $T(\lambda)$ 可表示为^[15]

$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + F \sin^2(\varphi/2)} = \frac{1}{1 + F \sin^2(2\pi d/\lambda)}, \quad (1)$$

式中 d 为标准具的厚度; φ 为标准具中参与多光束干涉效应的相邻两光束的相位差, $\varphi = 4\pi n d \cos \alpha' / \lambda$, 其中

λ 为入射光束波长, n 为标准具介质的折射率, α' 为光束进入标准具后的折射角, $\cos \alpha' \approx 1$; F 为标准具的精细度, 可表示为

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}, \quad (2)$$

式中 R 为标准具对光的反射率。

相邻两个透过率极大值的间隔[称为自由光谱范围(FRS)]为

$$\Delta\nu_m = \frac{c}{2nd \cos \alpha'} \approx \frac{c}{2nd}. \quad (3)$$

选择适当的厚度和反射率, 使 $\Delta\nu_m$ 与激光工作物质的增益线宽相匹配, 如图 1 所示。图 1 中 ν 为频率, $g^0(\nu)$ 为增益系数, $T(\nu)$ 为标准具透过率。可以看出, 处于增益曲线中心频率的纵模与标准具最大透过率处的频率一致, 该模式损耗最小, 其余纵模则在竞争中被抑制。

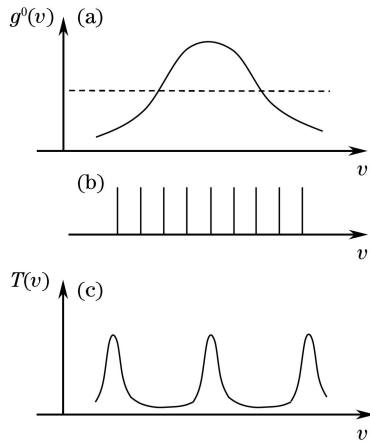


图 1 F-P 标准具选单纵模原理。(a)增益系数;(b)腔内纵模;(c)标准具透过率

Fig. 1 Principle of single-longitude-mode selecting by F-P etalon. (a) Gain coefficient; (b) longitudinal modes in cavity; (c) transmittance of etalon

2.2 单纵模激光器系统构成

基于 F-P 标准具选模机制的脉冲单纵模激光器系统如图 2 所示, 该系统由激光器光学部分和电控系统构成。激光器光学部分由抽运源、抽运耦合系统、激光晶体、抽运输入镜、平凹输出镜、声光调制器和标准具等构成。抽运源为 808 nm 光纤耦合输出激光二极管, 光纤芯径为 105 μm , 最大输出功率为 2 W。耦合系统由两片焦距分别为 25 mm 和 50 mm 的平凸透镜组成, 同时镀制 808 nm 高透膜。激光晶体为 Nd^{3+} 掺杂浓

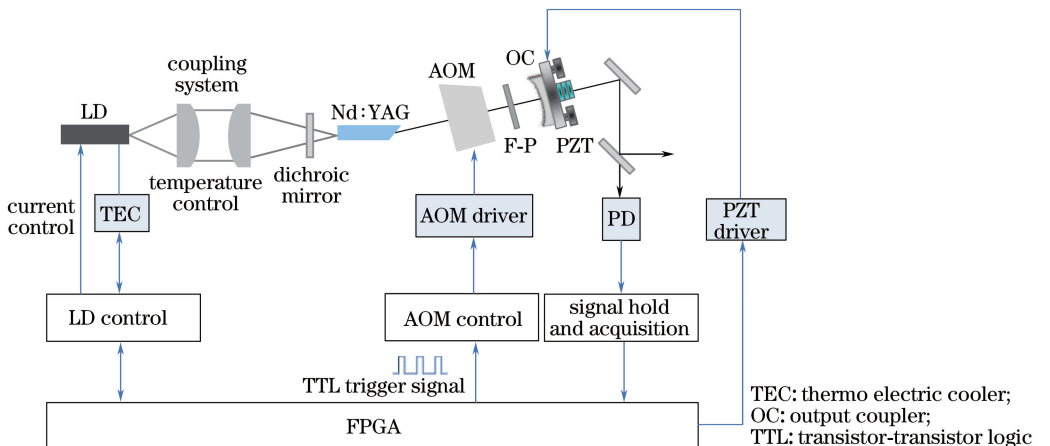


图 2 脉冲单纵模激光器系统示意图

Fig. 2 Diagram of pulsed single-longitude-mode laser system

度为 1% (原子数分数) 的 Nd:YAG, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 7 mm, 单面切布氏角为 62°, 保证了线偏振光起偏。谐振腔长为 44.5 mm。声光调制器 (AOM) 可实现调 Q 运转。利用 F-P 标准具进行单纵模选择。激光器少部分能量信号经折转镜透射并 PD 采集, 从而为腔长控制提供信号。输出镜位置由 PZT 调节, 调节精度达到 nm 量级。

激光器系统的电控部分由 FPGA 数字电路、半导体激光器 (LD) 驱动电路、声光调制器驱动电路、光电二极管信号采集电路以及 PZT 控制电路组成。半导体激光器驱动电路为半导体激光器提供稳定的工作电流与温度; 声光调制器驱动电路为声光调制器提供 27 MHz 射频; PZT 控制电路为 PZT 提供高达 100 V 的直流电压, 实现谐振腔 nm 级的调节精度; 光电二极管信号采集电路可以对 ns 级激光信号进行高速采集, 将其转化为数字信号并输入到 FPGA 数字电路; FPGA 数字电路为激光器系统的控制器, 其功能主要包括设定半导体激光器的工作电流和温度、为声光调制器提供触发时序信号、对光电二极管信号采集电路提供的信息进行处理运算以及控制 PZT 对谐振腔的调节。

根据上述 F-P 标准具选单纵模原理, 当纵模频率与 F-P 透射峰重合时 (即标准具透过率最大) 谐振腔损耗最小, 此时可获得最大的输出能量; 当激光的纵模频率偏离透过率曲线极大值所在的频率处时, 标准具损耗增大, 输出能量减小。谐振腔内纵模间隔由腔长决定, 腔长的变化直接影响纵模频率。图 (3) 计算了腔长在 50 mm 至 50 mm + 200 nm 范围内 (即腔长变化 200 nm) 腔内纵模的变化, 以及对应 F-P 透射率的变化。由图 (3) 可知, 当腔长改变 200 nm, 腔内纵模在 F-P 中的透射率会有明显变化, 相应各纵模的损耗也会有明显减小。工作环境温度、机械结构应力以及振动等影响都会带来谐振腔长的变化, 引起纵模与标准具滤波器的不匹配, 从而影响输出能量的稳定性。

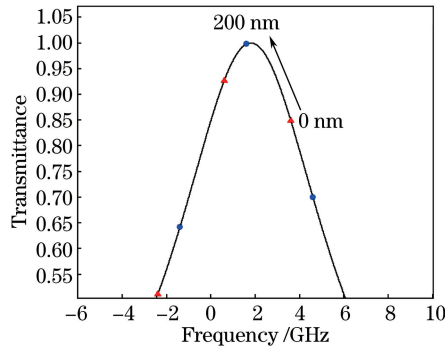


图 3 腔长在 50 mm 至 50 mm + 200 nm 范围内时 F-P 透射率的变化情况

Fig. 3 Influence of cavity length from 50 mm to 50 mm + 200 nm on F-P transmittance

3 能量稳定控制方法

基于上述系统及分析, 提出了动态反馈控制腔长的能量稳定方法。系统工作流程如图 4 所示。

具体控制方法分为两步。

1) 查找过程。在 PZT 上加载扫描电压 (20~50 V), 如图 5 所示, 激光能量出现周期性变化, 记录扫描全程的信号变化。扫描过程覆盖约 2 个纵模间隔, 当 F-P 透射峰与纵模相匹配时单纵模起振, 输出能量随腔长变化过程 (即纵模频率变化) 中出现若干个极大值, 同时记录输出能量极大值对应的 PZT 电压 V_0 , 并将 PZT 电压 V_0 设定在中间值附近的能量极大值处。

2) 跟踪维持过程。环境等因素的影响使得激光器的腔长发生微小改变, 进而使纵模与标准具滤波曲线失配, 因此需要不断调节 PZT 位置以维持纵模与滤波器匹配, 并使激光能量稳定在极大值附近。在跟踪过程中找到峰值能量对应的 PZT 电压 V_0 后, 程序开启单频维持过程。在此过程中, PZT 加载电压 V_{PZT} 由设定的直流电压 V_0 与小幅三角波电压 $\Delta V(t)$ 合成, 即 $V_{PZT} = V_0 + \Delta V(t)$, 如图 6 所示。利用 PZT 加载的直流电压分量 V_0 调节腔镜位置与谐振腔长度, 使激光器输出能量达到极大值, 此时, 腔镜位置可以称为极大值位置; PZT 加载的周期性三角波电压分量 $\Delta V(t)$ 可使装载在 PZT 上的腔镜以极大值位置为中心进行小幅往返运动, 激光器输出能量随之发生微小变化, 即能量产生小幅调制。通过三角波电压与其对应的输出能量变

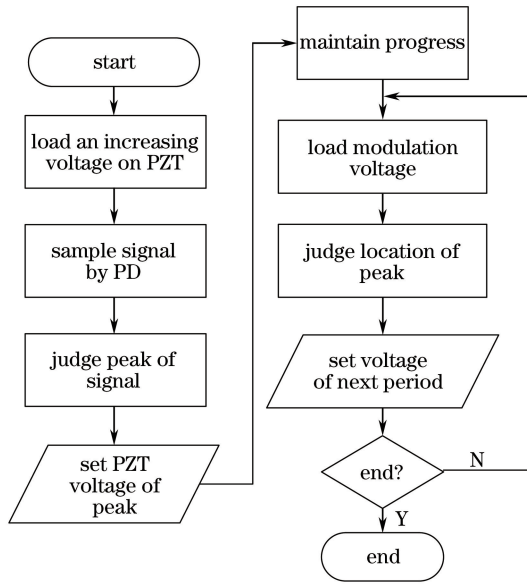


图 4 能量稳定控制系统工作流程图

Fig. 4 Working flow chart of energy stability control system

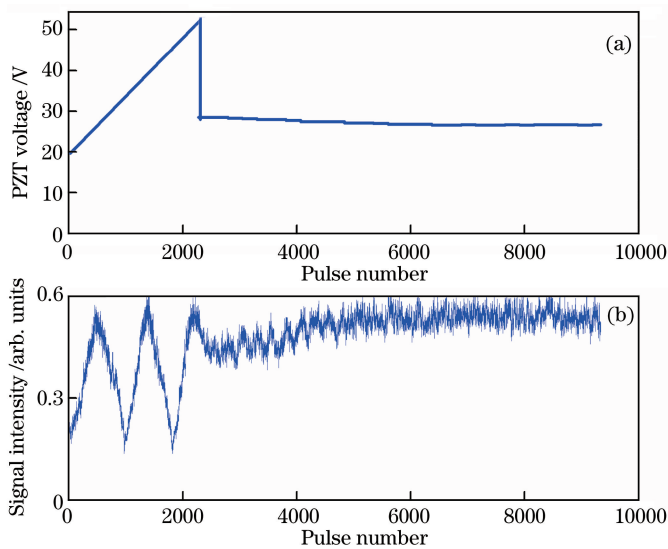


图 5 能量稳定控制系统工作时序图。(a)加载在 PZT 上的电压;(b)信号强度

Fig. 5 Working timing series diagram of energy stability control system. (a) Voltage loaded on PZT; (b) signal intensity

化判断能量极大值位置的偏移,从而为反馈提供依据。判断方法为:将 PZT 小幅三角波扫描电压三等分,分别定义为低、中、高电压;一个小幅三角波扫描周期完成后,当能量峰值出现在 PZT 低电压位置时,降低下个周期的 PZT 电压 V_0 ;当能量峰值出现在 PZT 高电压位置时,增加 V_0 ;当能量峰值出现在中间部分,则保持电压 V_0 不变。

4 实验结果

为了验证以上控制系统的运行效果,开展了是否加载控制的激光能量稳定性对比实验。激光器的重复频率为 100 Hz,测试时间为 3 h。

首先测试了不加载反馈控制情况下激光器的输出能量稳定性。先调节 PZT 位置,使输出的激光能量达到最大值,再对激光能量进行连续监测,其能量波动如图 7(a)所示,能量不稳定性(相对标准差)为 5.1%,具体实验数据如表 1 所示。可见,环境温度变化和系统产热等因素改变了激光器谐振腔长,从而影响了激光能量的稳定输出。

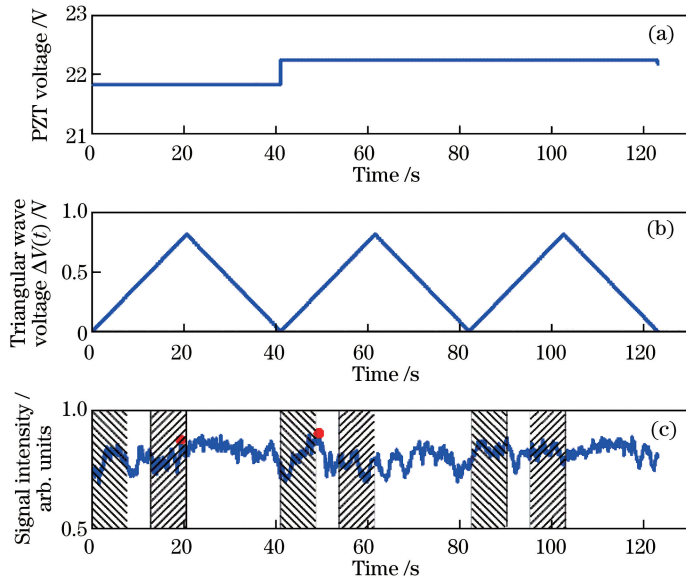


图 6 维持过程工作时序图。(a) PZT 电压;(b)三角波电压;(c)信号强度

Fig. 6 Working timing series diagram in maintain progress. (a) Voltage of PZT; (b) triangular wave voltage; (c) signal intensity

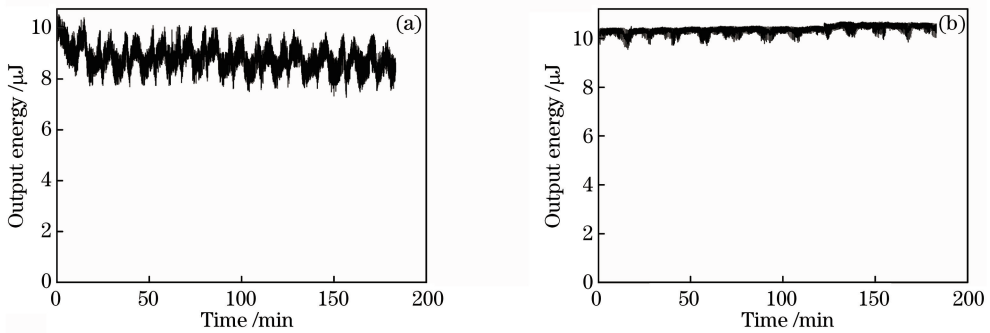


图 7 (a)未加载和(b)加载能量稳定控制系统时的输出能量稳定性测试

Fig. 7 Testing of output energy stability of system (a) with and (b) without energy stability control

开启能量稳定控制系统后,通过查找能量峰值,使激光器工作在能量极大值状态下;系统自动开启维持过程后,对输出能量进行测试。对激光能量进行连续监测,其能量波动如图 7(b)所示,能量不稳定性(相对标准差)为 1.3%,具体实验数据如表 1 所示。由对比实验可见,能量稳定控制系统通过调节 PZT 位置,有效补偿了环境温度变化和系统产热等因素对激光器谐振腔长的影响,从而改善了激光器的能量稳定性。

表 1 能量稳定性测试结果

Table 1 Testing results of energy stability

Parameter	Without energy stability control system	With energy stability control system
Maximum of energy / μJ	10.55	10.67
Minimum of energy / μJ	7.25	9.55
Range of energy / μJ	3.30	1.12
Mean of energy / μJ	8.77	10.36
Standard deviation of energy /nJ	450.00	138.70
Root-mean-square /%	5.10	1.30

利用高速光电探头和示波器测量了激光脉冲波形,如图 8 所示,脉冲宽度为 30.08 ns,且脉冲波动光滑,无多纵模干涉带来的拍频。利用标准具多光束干涉法对激光的单纵模光谱特性进行测试。采用的 F-P 标准具的表面反射率为 94%,自由光谱范围为 2.57 GHz。通过标准具多光束干涉,在 CCD 上得到干涉图样,如图 9 所示。可以看出,干涉图样为多个干涉圆环,对应单一纵模。

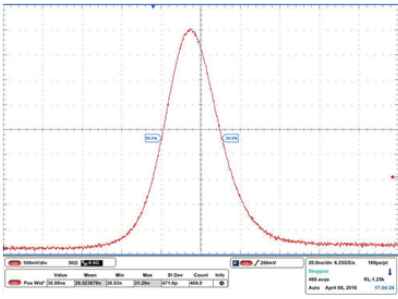


图 8 单纵模激光脉冲时间波形

Fig. 8 Pulse time profile of single-longitude-mode laser

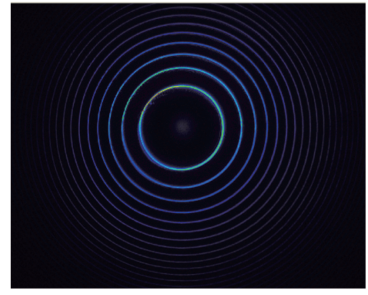


图 9 单纵模激光干涉图样

Fig. 9 Interference fringe of single-longitude-mode laser

5 结 论

针对含有标准具的脉冲单频激光器输出能量易受环境变化影响的问题,设计了一种基于 FPGA 的高速数字电路的能量稳定控制系统。系统通过计算光反馈信号,自动调节控制谐振腔的长度,从而形成闭环反馈控制系统。实验结果表明,采用能量稳定控制系统后,脉冲单纵模激光器连续运行 3 h 的能量不稳定性由无能量稳定控制系统的 5.1% 提高到 1.3%。

参 考 文 献

- [1] Zheng Yi, Xing Junhong, Jiao Mingxing, *et al.* Control system for stabilizing output power of diode-pumped single-frequency Nd:YAG laser at 1064 nm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 791-796.
郑毅, 邢俊红, 焦明星, 等. 二极管泵浦 1064 nm 单频 Nd:YAG 激光器输出功率稳定控制系统设计[J]. *应用光学*, 2011, 32(4): 791-796.
- [2] Zhang J, Ma H L, Xie C D, *et al.* Suppression of intensity noise of a laser-diode-pumped single-frequency Nd:YVO₄ laser by optoelectronic control[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(6): 1068-1074.
- [3] Wu Haokun. The research of controlling technology of ultra-narrow-band single longitudinal mode fiber laser pump source[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 30-33.
伍浩坤. 超窄带单纵模光纤激光器泵浦源控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 30-33.
- [4] Shen Hongchao, Wu Songhua, Qin Shengguang, *et al.* Frequency stability based on molecular absorption spectrum of single-frequency pulse laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902010.
沈红超, 吴松华, 秦胜光, 等. 单频脉冲激光器的分子吸收光谱频率稳定技术研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902010.
- [5] Guo Wenjie, Yan Zhaoai, Hu Xiong, *et al.* Long-term frequency stabilization system in 532 nm wind lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130004.
郭文杰, 闫召爱, 胡雄, 等. 532 nm 测风激光雷达长时间稳频系统[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(S1): S130004.
- [6] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, *et al.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [7] Black E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *American Journal Physics*, 2001, 69(1): 79-87.
- [8] Bian Zhenglan, Huang Chongde, Gao Min, *et al.* Research on control technique for Pound-Drever-Hall laser frequency stabilizing system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0302001.
卞正兰, 黄崇德, 高敏, 等. PDH 激光稳频控制技术研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0302001.
- [9] Xing J H, Jiao M X, Zheng Y, *et al.* Design of digital Pound-Drever-Hall frequency stabilizing system for two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser[C]. *SPIE*, 2013, 8759: 875941.
- [10] Su Juan, Jiao Mingxing, Ma Yuanyuan, *et al.* Design of Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization system using the quadrature demodulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0316001.
苏娟, 焦明星, 马源源, 等. 正交解调 Pound-Drever-Hall 激光稳频系统设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0316001.
- [11] Wu Jucai. Research on frequency stabilization technology of Nd:YAG laser based on the three harmonic demodulation of iodine absorption spectrum[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 2-7.

- 吴举才. 基于碘吸收谱外调制三次谐波解调的 Nd:YAG 激光器稳频技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 2-7.
- [12] Hall J L. Frequency-stabilized lasers: A parochial review[C]. SPIE, 1993, 1837: 2-15.
- [13] Liu Z H, Hu Z H, Qi L, *et al.* A digital frequency stabilization system of external cavity diode laser based on LabVIEW FPGA[C]. SPIE, 2015, 9671: 96711B.
- [14] Geng Weibiao, Hu Shuling, Shao Hongfeng. Design of laser frequency stabilization systems based on FPGA and Pound-Drever-Hall technique[J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 665-668.
耿伟彪, 胡姝玲, 邵洪峰. 基于 FPGA 数字相位调制光外差激光稳频系统设计[J]. 激光技术, 2014, 38(5): 665-668.
- [15] Lan Xinju, Wei Guanghui, Xin Jianguo. Laser technology[M]. Beijing: Science Press, 2000: 210-216.
蓝信钜, 魏光辉, 辛建国. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 210-216.