

内置法布里-珀罗标准具 629 nm He-Ne 激光器

聂晓明¹ 龙兴武¹ 张 斌¹ 梁 晶²

(¹ 国防科技大学光电科学与工程学院光电工程系, 湖南 长沙 410073; ² 中国人民解放军 73906 部队, 江苏 南京 210028)

摘要 He-Ne 激光器采用内置法布里-珀罗(F-P)标准具的方法可以获得与 633 nm 紧邻的 629 nm 谱线,这是用传统的镀膜方法无法实现的。分析了由于激光腔内的温度变化引起的 629 nm 谱线透射窗口的移动。为了得到稳定的 629 nm 波长输出,估算了 F-P 标准具的角度调节范围下限。提出了一种大角度范围的压电角度调节机构,应用于 F-P 标准具的角度调节。同时采用反馈控制算法实现了 629 nm 波长的稳定输出,稳定输出功率约 80 μ W。

关键词 激光器; He-Ne 激光器; F-P 标准具; 压电弯曲执行器

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0814004

629 nm He-Ne Laser Using Built-in Fabry-Perot Etalon

Nie Xiaoming¹ Long Xingwu¹ Zhang Bin¹ Liang Jing²

¹Department of Optoelectronic Engineering, College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
²People's Liberation Army 73906, Nanjing, Jiangsu 210028, China

Abstract 629 nm spectral line can be obtained with the method using Fabry-Perot (F-P) etalon in He-Ne laser cavity. That spectral line is hard to realize by the traditional method, like coating film. The shifting of 629 nm line's transmission window in F-P etalon is analyzed. In order to obtain a stable 629 nm output, the lower limit of the F-P etalon's angle range is calculated. A new folding piezoelectric angle controller is presented, which can provide a wide angle range adjustment. A stable output 629 nm He-Ne laser is realized with a feedback control. The stable output light power reaches 80 μ W approximately.

Key words lasers; He-Ne laser; F-P etalon; piezoelectric bending actuator

OCIS codes 140.1340; 140.3460; 140.7300

1 引 言

633 nm 波长的 He-Ne 激光器已经非常成熟。然而,与之非常临近的 629 nm 波长的 He-Ne 激光器却非常难以获得。梁晶等^[1]提出一种内置法布里-珀罗(F-P)标准具在激光器内选谱线的方法,通过合理选择 F-P 标准具的厚度及反射率参数,以及在使用中改变 F-P 标准具与光束夹角,实现抑制 633 nm 波长,同时保证 629 nm 波长增益,最终实现激光器输出 629 nm 波长的激光。然而激光腔内的温度变化导致 F-P 标准具的 629 nm 透射窗口移动,进而导致输出功率不稳定,甚至不出光(掉光)。这个问题的解决对

629 nm 波长激光器的应用至关重要。

本文提出一种紧凑型的大角度范围 F-P 标准具角度调节机构,并采用闭环反馈控制实现了 He-Ne 激光器 629 nm 波长的长时间稳定输出。

2 内置 F-P 标准具选谱线基本原理

一束频率为 ν 的光,以角 α 入射 F-P 标准具。由于 F-P 标准具中的多光束干涉,不考虑吸收的情况下,光束的透射率为^[2]

$$T(\nu, \alpha) = 1 / \left[1 + F \sin^2 \left(\frac{2\pi\nu n h \cos \alpha'}{c} \right) \right], \quad (1)$$

收稿日期: 2011-01-07; **收到修改稿日期**: 2011-03-28

作者简介: 聂晓明(1986—),男,博士研究生,主要从事新型激光器技术和激光干涉测量等方面的研究。

E-mail: thudpim@gmail.com

导师简介: 龙兴武(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测、薄膜光学与技术、新型激光器以及激光在惯性导航技术中的应用等方面的研究。E-mail: xwlong110@sina.com

式中 $F = 4R/(1-R)^2$, R 为标准具表面对入射光的反射率; h 为标准具的厚度; α' 为光进入标准具时的折射角, 与入射角 α 以折射定律一一对应; c 为光在真空中速度。加工好的 F-P 标准具可以调节的只有入射角 α , 以及入射的光束频率, 所以 F-P 标准具的透射率是入射光频率和入射角的函数。取 F-P 标准具的厚度 $h = 1.9891$ mm, 两个平面的反射率 $R = 0.034$, 折射率 $n = 1.45698$ 。图 1 为随着光束入射 F-P 标准具的角 α 的变化, 629 nm 波长光(实线)和 633 nm 波长光(虚线)的透射率曲线。

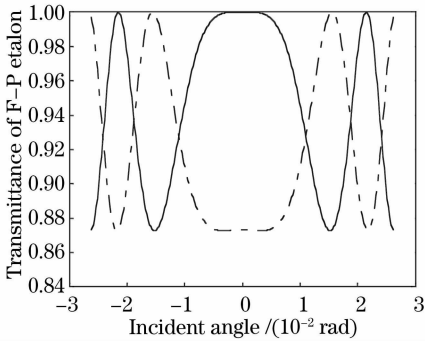


图 1 F-P 标准具透射率随入射角的变化曲线

Fig. 1 Transmittance of F-P etalon versus incident angle

由图 1 看出, 随着角度的变化谱线的透射率是波动变化的。所选用 He-Ne 激光器谐振腔 $L = 248$ mm,

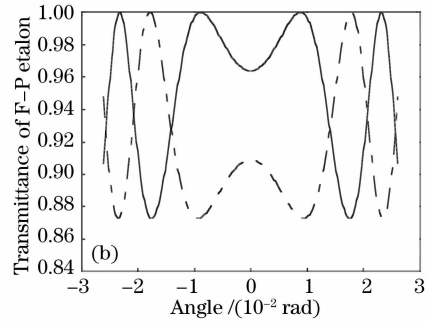
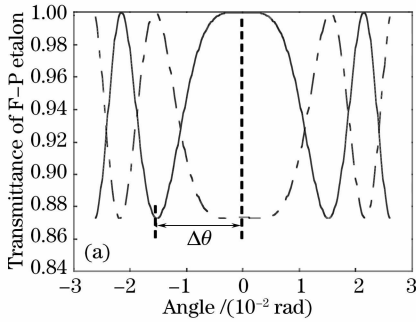


图 2 F-P 标准具透射率曲线。(a)厚度 1.9891 mm; (b)厚度 1.9891 mm+0.032 μm

Fig. 2 Transmittance curve of F-P etalon. (a) Thickness 1.9891 mm; (b) thickness 1.9891 mm+0.032 μm

温度的变化是一个连续的过程, 所以透射窗口的移动也是一个连续的过程。要得到 629 nm 光的稳定输出, 就需要 F-P 角度调节机构能够在温度变化的过程中, 对透射窗口的移动进行跟踪。

通过计算可得, 图 2(a)中 629 nm 透射率曲线中与入射角 $\alpha = 0$ 紧邻的波谷处对应入射角为: $\Delta\theta = 0.0154$ rad = 0.88° 。为确保 629 nm 波长的稳定输出, 这个角度即为 F-P 标准具角度调节范围的下限。考虑到安装误差以及调节的可靠性, F-P 标准具的角度调节范围要达到这个数值的 5 倍以上为

根据文献[3]可求得 633 nm 谱线的单程增益约为 $G_{633} = 4.3\%$; 根据文献[4]中数据可得 629 nm 谱线的单程增益约 $G_{629} = 0.8\%$ 。而 F-P 透射率的最大值 $T_{\max} = 1$; 最小值 $T_{\min} = \frac{1}{1+F} = \frac{(1-R)^2}{(1+R)^2} = 87.28\%$ 。

而且合理地选择了标准具的厚度可以确保 633 nm 波长的透射率最小值与 629 nm 波长的透射率最大值对应^[1], 故可通过调节光束入射 F-P 标准具角度 α 实现对 633 nm 波长的抑制同时保证 629 nm 波长的输出。以 629 nm 波长光的透射率最大值为中心, 透射率大于 $(1 - G_{629})$ 的角度区域称为 629 nm 光的一个“透射窗口”。

3 629 nm 稳定输出的角度调节要求

温度的变化会导致 F-P 厚度以及折射率的变化, 进而引起 F-P 标准具 629 nm 波长透射窗口的移动。图 2 为 F-P 标准具的透射率曲线, 其中图 2 (a) 为厚度 $h = 1.9891$ mm 时的透射率曲线; 图 2 (b) 为厚度增加 $0.032 \mu\text{m}$ 后的透射率曲线。考虑到 F-P 的热膨胀系数为 $5.4 \times 10^{-7}/\text{K}$, $0.032 \mu\text{m}$ 厚度的变化相当于 F-P 的温度变化了 30°C 。原来 629 nm 波长的透射窗口位于入射角 $\alpha = 0$ 处; 温度升高后, 629 nm 波长的透射窗口移动了, 而且分裂成了两个。

好。可见, 为了实现 629 nm 波长的稳定输出, 对 F-P 标准具的角度调节提出了较高的要求。

4 角度调节机构

利用压电陶瓷(PZT)的逆压电效应^[5], 可以通过电压控制压电陶瓷的伸长量。通过一个压电弯曲执行器(如图 3 所示), 不同的电压下两片压电陶瓷晶片的伸长变形量不同, 导致与之粘连的金属片弯曲^[6]。从而实现通过改变中间金属片上所加电压 U 控制 F-P 标准具的角度。

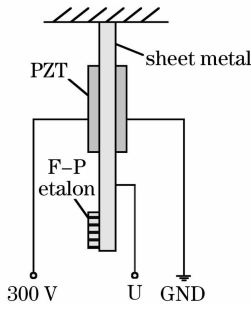


图 3 压电弯曲执行器

Fig. 3 Piezoelectric bending actuator

压电弯曲执行器的偏转角度与中间金属片的厚度 H 以及所贴压电陶瓷的长度 L 有关^[7,8]。分别选用不同厚度的金属片,贴不同长度的压电陶瓷,然后采用图 4 所示的系统测量压电双晶片压电弯曲执行器的最大偏转角。通过记录反射光点的移动距离和测量光接收屏与反射镜的距离可以得到压电弯曲执行器的偏转角。表 1 为 F-P 角度调节机构上加 300 V 电压后的实验结果。

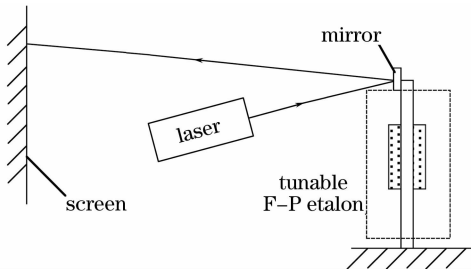


图 4 偏转角测量系统示意图

Fig. 4 Sketch map of the deflection angle measuring system

表 1 压电弯曲执行器测量数据

Table 1 Experimental data of piezoelectric bending actuator

Metal thickness	PZT length	L/H	Angle $\alpha / (^{\circ})$
H / mm	L / mm		
0.48	15	31.15	0.94
0.46	15	32.36	0.86
0.41	15	36.67	0.90
0.84	31	36.80	1.11
0.79	31	39.24	1.43
0.46	31	67.39	1.83
0.43	31	72.94	1.97

由于最大偏转角随厚度增加呈减小趋势,随长度增加呈增大趋势,故假设压电弯曲执行器的偏转角与长度厚度比 L/H 呈线性关系: $\alpha = k(L/H) + b$,通过最小二乘法拟合得到如下结果:斜率 $k = 0.0251$,截距 $b = 0.1555$,相关系数 $r = 0.9481$ 。

于是可以通过角度与 L/H 之间的近似线性关系在设计压电弯曲执行器的前期对 PZT 的长度以

及金属片的厚度进行粗略估计。考虑到金属片不能太薄,取 $H = 0.5 \text{ mm}$ 。那么如果要达到需要的 $5\Delta\theta = 4.4^{\circ}$,那么需要 PZT 的长度满足 $L > 84.5 \text{ mm}$ 。

金属片两端分别用于贴 F-P 标准具以及固定,所以实际的金属片的长度要达到 100 mm 左右。基于结构紧凑性的要求,本文提出了一个折叠式的结构,如图 5 所示(图中略去了压电陶瓷晶片之间的电气连接)。从 F-P 标准具到固定点的距离只有约 50 mm,压电陶瓷总长度达到 110 mm。采用图 4 所示的偏转角测量系统测量显示,该折叠结构的偏转角度达到了 6° 。

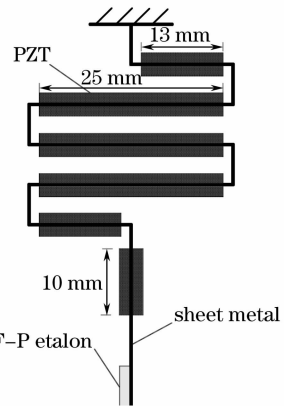


图 5 折叠型压电角度调节机构

Fig. 5 Folding piezoelectric angle controller

5 实验与分析

如前所述,F-P 标准具的角度调节范围已达到 6° 左右,能否满足稳定 F-P 选择 629 nm 波长的角度需要,仍需在 629 nm 激光器上进行检验;同时,能否跟上透射窗口的移动,稳定地输出 629 nm 波长也需要采用反馈控制来验证。

5.1 角度调节范围检验

检验角度调节机构的光路系统如图 6 所示。内置 F-P 标准具的激光器输出光束经过一个半透半反镜分光,一束打到光电探测器上,用于记录光强变化;一束打到闪耀光栅上用于鉴别激光器输出谱线

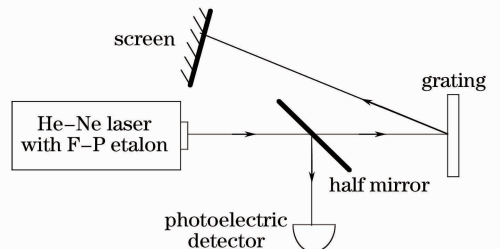


图 6 检验光路

Fig. 6 Testing optical circuit

的波长。其中接收屏距离光栅 $l=3.6\text{ m}$ 。

通过扫描 F-P 标准具角度调节机构(简称“F-P 调节机构”)上所加电压,可以改变 F-P 的偏转角,从而实现激光器不同波长的输出以及光强的改变。图 7 为 F-P 调节机构上所加电压 U 从 $0\sim 300\text{ V}$ 扫描后的光强分布图。其中光强由于只关心其相对变化,采用 A/D 采样得到的数值来表示,故无单位。

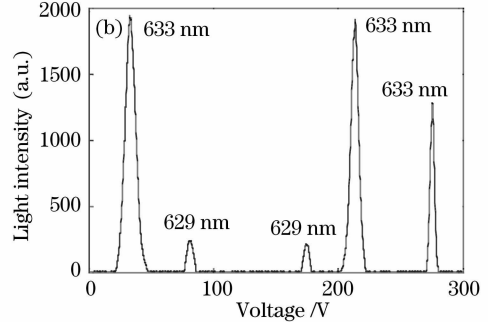
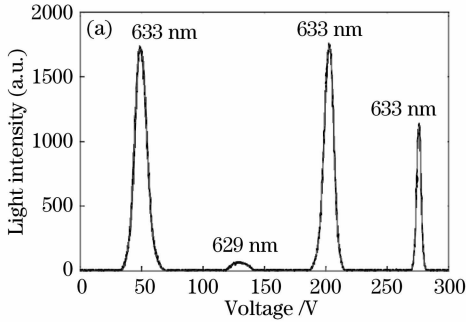


图 7 扫描 F-P 电压激光器光强输出。(a)激光器运行 1 min;(b)激光器运行约 1 h

Fig. 7 Light intensity by scanning the voltage of F-P etalon. (a) Laser runs for 1 min; (b) laser runs approximately for 1 h

对比图 7(a)、(b)中 629 nm 波长光脉冲,可以发现二者的宽度明显不同:激光器刚开始运行时 629 nm 波长光脉冲宽度较宽;运行时间 1 h 左右后,629 nm 波长光脉冲宽度明显变窄。结合图 2,629 nm 的振荡阈值可以得到解释。参见图 8,刚开始室温较低,F-P 标准具在角度为 0 附近对 629 nm 波长光只有一个透射窗口;随着激光器的运行,腔内温度逐渐增加,标准具的厚度 H 开始增加,F-P 标准具对 629 nm 光的透射窗口开始移动并分裂为两个,同时透射窗口的宽度也随之变窄,实际表现即为观察到的 629 nm 光脉冲宽度变窄。

图 7 中每个光脉冲对应的激光波长是通过闪耀光栅的一级衍射光来鉴别的。由光栅衍射理论可知,对于第一级衍射光,衍射角满足: $d\sin\theta=\lambda$ 。其中 $d=1/1200\text{ mm}$ 为光栅常数。所以对于 629 nm 和

图 7 说明该 F-P 角度调节机构的可调节范围足够大,角度范围可以覆盖多个 629 nm 光的透射窗口与 633 nm 光的透射窗口。同时,随着激光器运行时间加长,激光器的温度会逐渐上升,629 nm 光脉冲由一个分裂为两个,这一点在图 7 的对比中也看得很清楚。

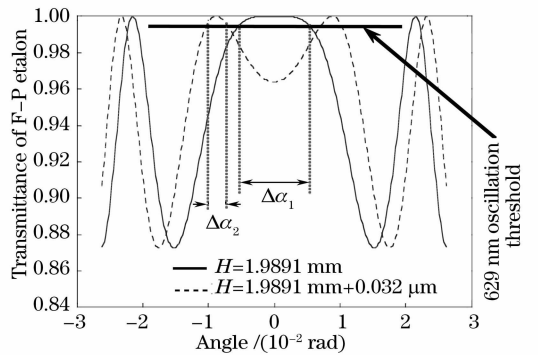


图 8 629 nm 光脉冲宽度对比

Fig. 8 Width of 629 nm light pulse

633 nm 光脉冲,在接收屏上的光点位置不一样。采用相机在一个固定的位置拍摄同一个画面,可以看到光点的移动,见图 9。图中竖线间隔 1 cm,两波长光的一级衍射光斑相距大约 2.2 cm。

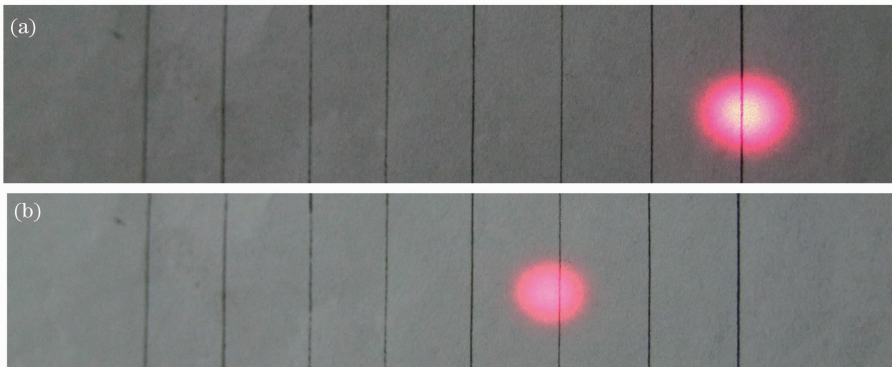


图 9 不同波长的光栅衍射光斑位置

Fig. 9 Diffraction light position of different wavelengths. (a) $\lambda=633\text{ nm}$; (b) $\lambda=629\text{ nm}$

根据衍射理论,629 nm 光和 633 nm 光(二者谱线对应的精确波长分别为 629.4 和 632.8 nm)的一级衍射角相差:

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{632.8 \text{ nm}}{d}\right) - \arcsin\left(\frac{629.4 \text{ nm}}{d}\right) = 0.0062 \text{ rad.} \quad (2)$$

理论上两波长光的一级衍射光斑距离:

$$\Delta l = \Delta\theta \cdot l = 0.0062 \times 3.6 \text{ m} = 2.23 \text{ cm.} \quad (3)$$

与图 9 中实验结果吻合,从而实现了 629 nm 波长谱线的鉴别。

5.2 反馈控制稳定 629 nm 光输出实验

从 0~300 V 线性增加 F-P 调节机构上电压 U , 记录输出光强随电压的变化曲线并找到 629 nm 光最大值对应电压。调节 F-P 调节机构上电压 U 至 629 nm 波长光透射窗口最大值处,然后不加任何反馈控制,大约 30 min 后 629 nm 波长光消失,如图 10 所示。

为稳定 629 nm 波长输出,采用闭环反馈,反馈控制系统框图如图 11 所示。He-Ne 激光器输出光

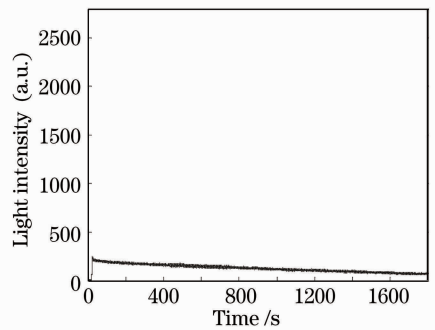


图 10 不加反馈时的激光器光强变化

束经半反镜,透射光直接由光功率计来监测激光器输出光功率大小;反射光送达闪耀光栅,取一级衍射光送到光电探测器。其中光电探测器前小孔光阑用于阻止 633 nm 的衍射光进入探测器。光电探测器得到的电流信号经由前置放大电路放大再经 A/D 转换到单片机处理。根据处理结果,单片机通过 D/A 及 5 V 转 300 V 电路控制 F-P 标准具的偏转角度,从而实现一个闭环的反馈控制。

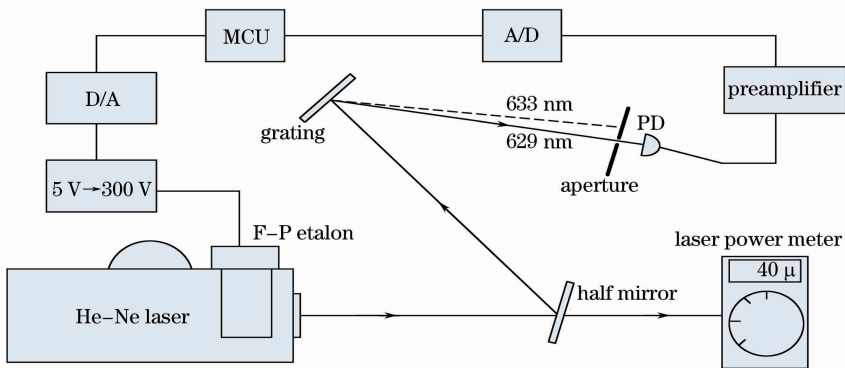


图 11 反馈控制系统框图

Fig. 11 Feedback system

由于 629 nm 光的光强输出随着电压的变化呈现一个先增后减的规律。通过单片机(MCU)递增式地送出三个电压值 $V_1 = (V - V_{STEP})$, $V_2 = V$, $V_3 = (V + V_{STEP})$, 同时记录每个电压值对应的光强值 I_1, I_2, I_3 。根据三个光强值之间的大小关系可以判断出当前 629 nm 波长光在电压光强曲线上所处的位置,如图 12 所示。

如果 $I_3 > I_2 > I_1$, 那么说明随着电压的增大,光强也增大,即光强处于光脉冲最大值的左边,需要增加电压。

如果 $I_3 < I_2 < I_1$, 即随着电压的增大,光强一直减小,说明光强处于光脉冲最大值的右边,需要减小电压。

如果 $I_3 < I_2$ 且 $I_1 < I_2$, 说明现在光强即为最大

值处,电压保持不变。

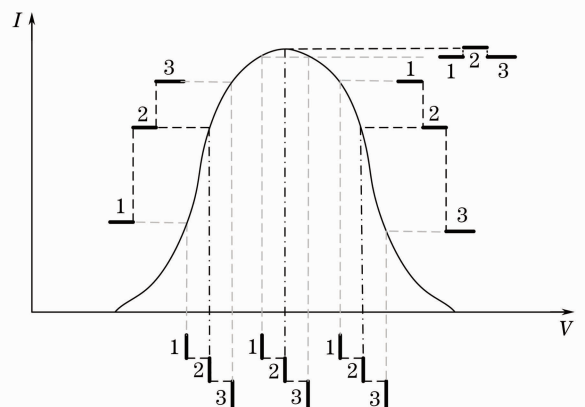


图 12 反馈控制原理示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the feedback control system

采用以上的反馈控制算法后 90 min 内光强变化曲线如图 13 所示,得到稳定输出的 629 nm 波长。其中光强由于只关心其相对变化,采用 A/D 采样得到的数值来表示,故无单位。采用光功率计测量半透半反镜的透射光光功率在 $40 \mu\text{W}$ 左右,也即激光器输出 629 nm 波长总功率在 $80 \mu\text{W}$ 左右。

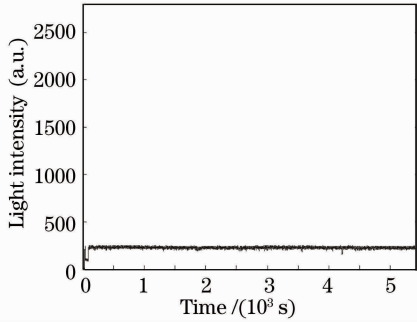


图 13 加了反馈控制后的激光器光强变化

Fig. 13 Light intensity with feedback in 90 min

6 结 论

分析了由于激光腔内的温度变化引起的 629 nm 谱线透射窗口的移动,提出了一种大角度范围的压电角度调节机构,应用于 F-P 标准具的角度调节,同时采用反馈控制算法以实现 629 nm 波长的稳定输出。理论和实验表明,将大角度范围调节机构及闭环反馈控制算法应用于 629 nm 波长激光器,可以得到稳定的 629 nm 波长光输出,为进一步地应用 629 nm 光于多波长绝对距离测量^[9~10]提供了指导。

参 考 文 献

1 Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. Spectral selection in He-Ne laser by internal F-P etalon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3108~3113

- 梁 晶,龙兴武,张 斌等. 一种内置法布里-珀罗标准具选择 He-Ne 激光器内谱线的方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3108~3113
- 2 Yin Chunyong. *Modern Interferometric Measuring Technique* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. 412~414
- 殷纯永. 现代干涉测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999. 412~414
- 3 Cai Borong, Wei Guanghui, Wang Ruifeng *et al.*. *Laser Devices* [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1981. 30
- 蔡伯荣,魏光辉,王瑞丰等. 激光器件[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1981. 30
- 4 Gao Bolong, Ding Jinxing, Long Xingwu *et al.*. Green (yellow, green) He-Ne laser with internal cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12): 1617~1621
- 高伯龙,丁金星,龙兴武等. 全内腔绿(黄、橙)光 He-Ne 激光器[J]. *光学学报*, 1995, **15**(12): 1617~1621
- 5 Sun Kang, Zhang Fuxue. *Piezoelectricity*[J]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984
- 孙 康,张福学. 压电学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984
- 6 Qing-Ming Wang, L. Eric Cross. Constitutive equations of symmetrical triple layer piezoelectric benders[J]. *IEEE Trans. Ultrason., Ferr.*, 1999, **46**(6): 1343~1351
- 7 E. Shiju, Yang Zhigang, Shen Chuanliang. Influence of the thickness of piezoelectric and elastic layers on the bender element characteristic[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2009, **32**(3): 1~4
- 鄂世举,杨志刚,沈传亮. 压电及弹性层厚度对弯曲元件特性影响的研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2009, **32**(3): 1~4
- 8 E. Shiju, Liu Jianfang, Zhu Xilin *et al.*. Experimental research on the effect of length of piezoelectric bender on its characteristics [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, **31**(3): 364~365, 369
- 鄂世举,刘建芳,朱喜林等. 压电弯曲元件的长度对其特性影响的实验研究[J]. *压电与声光*, 2009, **31**(3): 364~365, 369
- 9 Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin. Study on a new kind of multi-wavelength absolute distance interferometer[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(5): 681~683
- 梁 晶,龙兴武,张 斌. 一种新型多波长绝对距离干涉测量系统的研究[J]. *光学技术*, 2008, **34**(5): 681~683
- 10 Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. Absolute distance measurement by using 117 μm synthetic wavelength[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2947~2951
- 梁 晶,龙兴武,张 斌等. 用 117 μm 合成波长实现绝对距离干涉测量[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2947~2951