

# 自动宽调谐的全固态连续单频钛宝石激光器

苏 静<sup>1,2</sup>, 靳丕铎<sup>1</sup>, 卫毅笑<sup>1</sup>, 卢华东<sup>1,2\*</sup>, 彭堃堃<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>山西大学光电研究所量子光学与量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

<sup>2</sup>山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

**摘要** 设计了一种基于 LabVIEW 控制的自动宽调谐的连续单频钛宝石激光器, 通过波长计测量激光器输出波长, 用 LabVIEW 程序读取该波长值并产生控制信号, 反馈控制腔内调谐元件双折射滤波片(BRF)的角度, 实现对激光器输出波长的调谐。此外, 基于波长计测量的系列波长值, 构建了 BRF 角度与激光器输出波长值的一一对应关系, 由 LabVIEW 程序根据不同的波长设定值控制 BRF 旋转不同的角度, 使钛宝石激光器不需要波长计也能实现自动调谐, 简化了激光器系统。对实验设计的钛宝石激光器进行自动调谐, 测量得到其调谐范围为 110 nm。

**关键词** 激光器; 钛宝石激光器; 自动可调谐; LabVIEW; 单频

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0701006

## Automatically and Broadly Tunable All-Solid-State Continuous Single-Frequency Ti:Sapphire Laser

Su Jing<sup>1,2</sup>, Jin Pixian<sup>1</sup>, Wei Yixiao<sup>1</sup>, Lu Huadong<sup>1,2</sup>, Peng Kunchi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

**Abstract** An automatically and broadly tunable Ti:sapphire laser based on the control of LabVIEW is designed, which is implemented by feedback controlling the angle of intracavity birefringent filters (BRF). The feedback signal is generated by LabVIEW program after the laser output wavelength measured by a wavelength meter is obtained. Then the one-to-one relationship between the BRF angle and the laser output wavelength is established based on the measured wavelengths. The BRF angle corresponding to the setting wavelength is calculated and then controlled by LabVIEW procedure, so that the laser wavelength can be automatically tuned without wavelength meter, which simplifies the laser system. With the automatically tunable system, the tuning range of the designed Ti:sapphire laser is 110 nm.

**Key words** lasers; Ti:sapphire laser; automatically tunable; LabVIEW; single-frequency

**OCIS codes** 140.3590; 140.3600; 140.3570

## 1 引 言

全固态连续单频可调谐钛宝石激光器的输出光谱范围(700~1100 nm)覆盖了钾、铷、铯等碱金属原子的吸收线波段, 因此可广泛应用于原子俘获与冷却<sup>[1]</sup>、原子时钟<sup>[2]</sup>、玻色爱因斯坦凝聚、量子存储<sup>[3]</sup>、光学磁力仪<sup>[4]</sup>以及原子力显微镜等基于原子的科学研究实验中。上述应用均要求激光器输出频率精确地对应于原子的吸收线, 这就要求钛宝石激光器不仅具有较宽的调谐范围, 还需具备有一定的频率连续调谐能力。目前市面上已有几款商业可调谐钛宝石激光器产品<sup>[5-8]</sup>供科研工作者选用。在国内这方面的研究工作却鲜有文

收稿日期: 2017-02-06; 收到修改稿日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61405107, 61227902, 61640404)、国家重点研发计划(2016YFA0301401)

作者简介: 苏 静(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事全固态可调谐激光器器件方面的研究。

E-mail: jingsu@sxu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: luhudong@sxu.edu.cn

献报道,近几年,山西大学彭堃堃课题组开展了全固态连续单频可调谐钛宝石激光器的研制工作<sup>[9-16]</sup>。首先优化设计激光器的腔型结构<sup>[9]</sup>,并基于弛豫振荡频率测量激光器谐振腔内的损耗<sup>[10]</sup>,进而选取最佳输出耦合镜透射率<sup>[11]</sup>获得稳定的高功率单频激光输出。通过调制锁定腔内标准具,获得调谐范围为 65 nm,频率连续调谐范围为 15.2 GHz 的连续单频激光输出<sup>[12]</sup>。然后采用铌酸锂晶体作为腔内标准具,利用其电光效应进行调制锁定,获得强度噪声可操控的可调谐钛宝石激光器,其调谐范围为 110 nm,频率连续调谐范围大于 20 GHz<sup>[13]</sup>。另外,通过在激光谐振腔内引入额外非线性损耗的方式,获得了在 795 nm 附近频率连续调谐范围达 48 GHz 的激光输出,但其调谐范围受到非线性晶体接收带宽的限制<sup>[14]</sup>。最后,利用光电负反馈的方法抑制了钛宝石激光器低频段强度噪声<sup>[15]</sup>,获得了低强度噪声的连续单频钛宝石激光器。此外,该课题组自行研制的全固态连续单频可调谐钛宝石激光器已被用于研制 795 nm 压缩源样机<sup>[16]</sup>。

目前,钛宝石激光器以及大部分的商业钛宝石激光器产品均是通过手动调节谐振腔内的调谐元件来实现可调谐的激光输出,这使得钛宝石激光器在使用过程中操作繁琐复杂,增加了人为操作的失误率,为科研工作者带来诸多不便。为了简化全固态连续单频可调谐钛宝石激光器的操作过程,降低人为操作的失误率,本文设计了基于波长计采集激光器输出波长并反馈控制的自动宽调谐钛宝石激光器,即由波长计采集激光器的输出波长,利用自行设计的 LabVIEW 程序读取该波长值,并反馈控制安装有双折射滤波片(BRF)的压电旋转电机,调节 BRF 的角度,实现对激光器输出波长的自动精准调谐。为进一步简化激光器系统,本文基于波长计测量的系列波长值构建了钛宝石激光器输出波长与 BRF 角度之间的关系式,由 LabVIEW 程序计算得到目标波长对应的角度值,并控制旋转 BRF,使其到达指定角度位置,从而在没有波长计的情况下也能实现对钛宝石激光器输出波长的自动宽调谐。

## 2 实验装置

实验设计的自动宽调谐钛宝石激光器系统如图1所示。钛宝石激光器结构中,抽运源采用自行研制的输出功率为 18 W,长期功率波动小于 $\pm 0.5\%$ (8 h)的连续单频 532 nm 激光器<sup>[17]</sup>(DPSS FG-VIII B,太原山大宇光科技有限公司,中国)。抽运源输出的激光经透镜  $f_1$  和  $f_2$  组成的耦合系统耦合进激光器谐振腔内并聚焦在钛宝石晶体的中心, $f_1$  和  $f_2$  的焦距分别为 200 mm 和 100 mm。谐振腔前面插入的半波片(HWP)用于调整抽运光的偏振方向,使得钛宝石晶体能够充分吸收抽运光的能量。谐振腔采用四镜 8 字环形腔,包括两个平凹镜( $M_1$  和  $M_2$ )和两个平面镜( $M_3$  和  $M_4$ ),其中,两平凹镜的凹面曲率半径均为 100 mm。 $M_1$  镀有 740~890 nm 高反膜和 532 nm 减反膜, $M_2$  和  $M_3$  均镀有 740~890 nm 高反膜, $M_4$  镀有 740~890 nm 部分透射膜( $T=5.5\%$ )。 $M_3$  粘结在压电陶瓷(PZT)上,PZT 安装在镜架上,在实验过程中,通过改变加载在 PZT 上的电压可以连续扫描谐振腔的腔长,从而实现激光器输出频率的连续调谐。同时,在特定工作频率处,利用反馈控制环路控制加载在 PZT 上的电压还可以将激光器输出频率锁定在某一稳定的参考频率上,

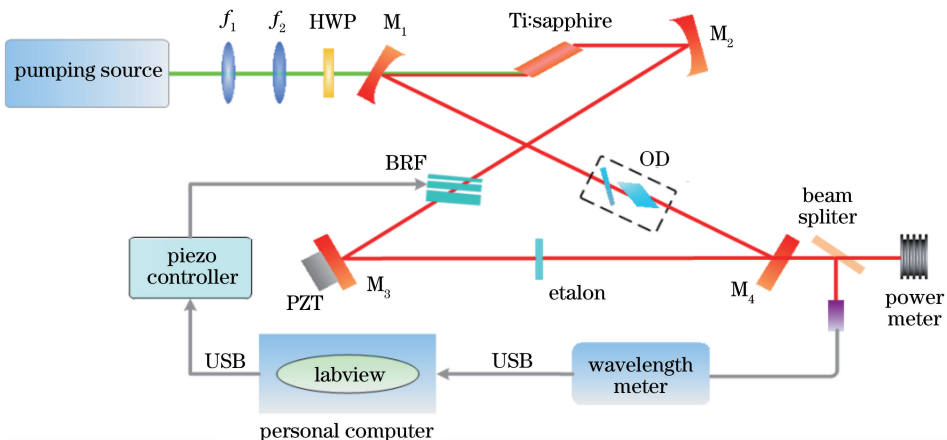


图 1 自动可调谐钛宝石激光器实验示意图

Fig. 1 Schematic of automatically tunable Ti:sapphire laser

从而稳定激光器输出频率,压窄激光器线宽。采用的钛宝石增益晶体,尺寸为  $\Phi 4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,掺杂质量分数为  $0.05\%$ ,其两端面均为布儒斯特角切割( $60.4^\circ$ )。晶体置于由循环水冷却的紫铜控温炉中,并放置在腔镜  $M_1$  和  $M_2$  之间。在激光谐振腔内插入由外加永磁场的铽镓石榴石晶体和自然旋光补偿片组成的宽带光学单向器(OD),保证了激光器在允许的波长调谐范围内均能稳定单向运转。为了获得连续单频的激光输出,在谐振腔内插入选模与调谐元件,BRF<sup>[18]</sup>和标准具。其中,BRF由三片厚度比例为  $1:2:4$ 即( $1 \text{ mm}:2 \text{ mm}:4 \text{ mm}$ )的石英晶片组成<sup>[19]</sup>,最薄的一片决定了其透射谱的自由光谱区,最厚的一片决定其透射谱的线宽。BRF放置在压电旋转电机(AG-PR100, Newport 公司,美国)中,且以布儒斯特角( $57^\circ$ )插入激光谐振腔内。晶体光轴平行于其表面,沿 BRF 轴向旋转晶体可以调整晶体光轴与入射光偏振方向之间的夹角  $\varphi$ ,实现激光器输出波长的宽调谐。标准具是厚度为  $1 \text{ mm}$  的铈酸锂电光晶体,用以抑制激光器跳模,保证单频运转。

激光器输出光束经分束器分出的大部分激光注入到功率计(LabMax-Top, Coherent 公司,美国)中监视激光器的输出功率和供客户端使用,剩余的一小部分激光注入到高精度的波长计中用来实时测量激光器的输出波长。所使用的高精度波长计(WS6, High Finesse Laser and Electronic System 公司,美国),测量精度为  $0.1 \text{ pm}$ 。波长计通过 USB 通讯接口与计算机进行通讯,由 LabVIEW 程序读取测量的波长值并产生相应的控制信号,然后计算机通过 USB 通讯接口将控制信息传递给压电旋转电机的压电控制板,进而旋转 BRF 的角度,实现激光器输出波长的宽调谐。

### 3 实验结果与分析

当激光器输出波长为  $795 \text{ nm}$  时,激光器输出功率随抽运功率的变化曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,激光器的阈值抽运功率为  $3.58 \text{ W}$ ,当抽运功率为  $16.53 \text{ W}$  时,获得最大输出功率  $2.88 \text{ W}$ ,对应的斜效率为  $22\%$ ,光-光转换效率为  $17.4\%$ 。同时,激光器输出功率的长期稳定性如图 3 所示。从图 3 可以看出, $3.5 \text{ h}$  内激光器输出功率的稳定性优于  $\pm 0.91\%$ 。利用光束质量分析仪(M2SETVIS, Thorlabs 公司,美国)测量了激光器输出光束质量,测量的光束质量因子  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为  $1.03$  和  $1.12$ ,其散焦曲线以及光场分布如图 4 所示。

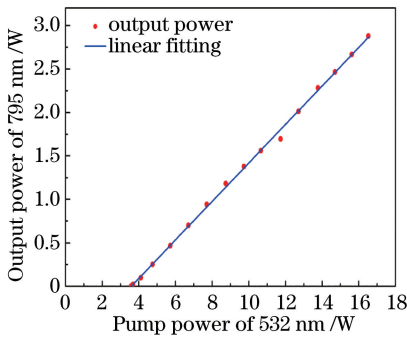


图 2 795 nm 激光输出功率随抽运功率变化的关系图

Fig. 2 Output power of 795 nm laser versus pump power

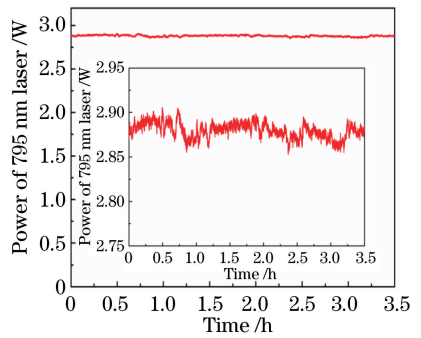


图 3 795 nm 激光的长期功率稳定性

Fig. 3 Long term power stability of 795 nm laser

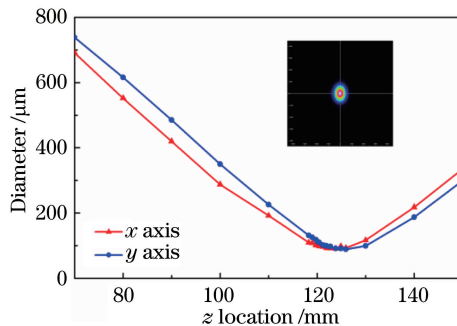


图 4 钛宝石激光器输出光束质量

Fig. 4 Beam quality of the Ti:sapphire laser

为实现钛宝石激光器的自动宽调谐,由波长计实时采集激光器输出波长,并由计算机中的 LabVIEW 程序读取测量的波长值,将该波长值与目标波长值进行比对,如果相差较远,则控制压电旋转电机向前旋转一步,直至实测波长值与目标波长值的差值在一定范围内时停止旋转电机。LabVIEW 程序的流程如图 5 所示,程序启动后,首先读取波长计测量的波长值  $\lambda_M$ ,然后判断其有效性。由于测量过程中,激光功率的波动或周围环境的干扰可能会使波长计产生无效的测量值,所以需要进行有效性判断,滤除掉这些无效的测量值,避免影响反馈控制系统的正常工作。如果读取到的波长值是无效的,则重新读取;如果波长值有效,则将其与目标波长值  $\lambda_S$  进行比较。当  $\lambda_M - \lambda_S \geq 0.1 \text{ nm}$  时,控制电机向“-”方向转一步,进入下一次循环;当  $\lambda_M - \lambda_S \leq -0.1 \text{ nm}$  时,控制电机向“+”方向转一步,进入下一次循环;当  $-0.1 \text{ nm} \leq \lambda_M - \lambda_S \leq 0.1 \text{ nm}$  时,循环停止,输出波长值已符合目标设定值。其中,0.1 nm 取决于标准具的自由光谱区。通过更改目标波长值  $\lambda_S$ ,即可实现激光器输出波长的调谐,调谐精度为 0.1 nm。

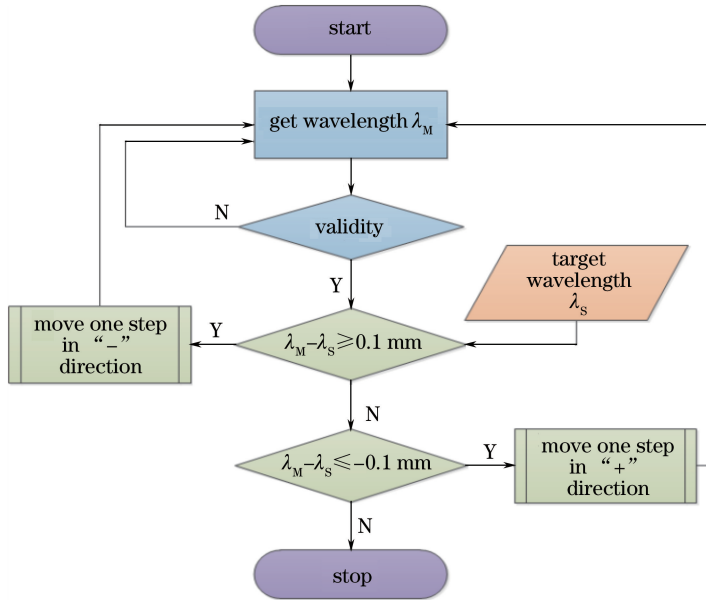


图 5 波长计参与反馈控制时的程序流程图

Fig. 5 Flow chart of the feedback control system with the wavelength meter

为了进一步简化自动宽调谐钛宝石激光器系统,降低成本,设计了没有波长计参与的控制系統,并对钛宝石激光器进行自动调谐。由于没有实时测量的波长值作为参考,所以首先需要建立起激光器输出波长与角度  $\varphi$  的一一对应关系。BRF 是一种偏振光干涉元件,其透射率最大处对应的光波长  $\lambda$  与角度  $\varphi$  之间的关系式为<sup>[20]</sup>

$$\lambda = \frac{d}{m} \left[ \frac{n_e (1 + \cos^2 \theta \cos^2 \varphi / n_e^2 - \cos^2 \theta \cos^2 \varphi / n_o^2)}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta \sin^2 \varphi / n_e^2 - \cos^2 \theta \cos^2 \varphi / n_o^2}} - \frac{n_o}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta / n_o^2}} \right], \quad (1)$$

式中  $d$  为 BRF 厚度,  $m$  为干涉级数,  $n_e$  和  $n_o$  分别表示石英晶体的非常光和寻常光的折射率,  $\theta$  为光束入射角。BRF 的自由光谱区是由最薄一片晶体的厚度决定,所以  $d = 1 \text{ mm}$ ;  $n_e$  和  $n_o$  为定值,  $n_e = 1.548$ ,  $n_o = 1.538$ ;虽然 BRF 以布儒斯特角插入谐振腔内,  $\theta$  可由理论求得,但是在实际的激光器中, BRF 的摆放存在人工误差,与理论值有一定偏差,所以仍需根据实际情况来确定,同样  $m$  也需根据实际情况来确定。

为了确定(1)式中的未知参量,实验测量了激光器输出波长随旋转电机转动步数的变化曲线,为确保激光器自动调谐的可重复性,实验上多次测量了该变化曲线,并求取平均值,测量结果如图 6 所示。根据测量的数据,并利用 Matlab 软件中的 Curve Fiting Tool 拟合曲线得到

$$m = 7, \quad (2)$$

$$\cos^2 \theta = 0.6608, \quad (3)$$

$$\varphi = ax + b = 0.00019x + 0.085. \quad (4)$$

对(4)式求微分可得,

$$\Delta \varphi = 0.00019 \Delta x, \quad (5)$$

式中  $a$  为旋转电机的旋转步长,  $b$  为调谐曲线中波长最小处对应的  $\varphi$  的初值, 单位均为 rad,  $x$  为旋转电机的转动步数。曲线拟合优度为  $R^2=0.9999$ , 表明实验测量值与拟合曲线的拟合程度非常好。根据上述确定的参数即可得到实验设计的激光器输出波长  $\lambda$  与角度  $\varphi$  之间的关系式  $\lambda=\lambda(\varphi)$ , 对该式求反函数即可得到角度  $\varphi$  关于波长  $\lambda$  的函数  $\varphi=\varphi(\lambda)$ 。

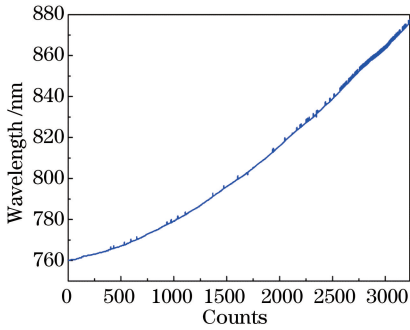


图 6 钛宝石激光器的调谐曲线

Fig. 6 Tuning curve of the Ti:sapphire laser

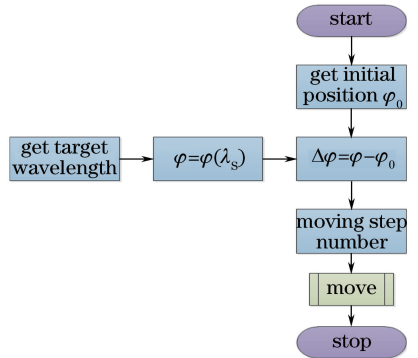


图 7 无波长计参与控制时的程序流程图

Fig. 7 Flow chart of the control system without wavelength meter

根据确定的函数关系  $\varphi=\varphi(\lambda)$ , 可由 LabVIEW 程序计算得到对应目标波长  $\lambda_s$  的角度值  $\varphi$ , 并控制旋转电机转动 BRF 的角度。同时, 程序上将 BRF 旋转角度范围限定在  $38^\circ$  以内, 保证在调谐范围内, 激光器输出波长  $\lambda$  与角度  $\varphi$  是绝对的一一对应关系。LabVIEW 程序流程如图 7 所示, 程序启动后, 首先读取上次的波长设定值, 求得当前 BRF 所处位置  $\varphi_0$ , 然后读取目标波长值  $\lambda_s$ , 并求得对应的角度值  $\varphi$ , 将两角度值求差, 即可得到 BRF 需要旋转的角度  $\Delta\varphi$ , 再根据(5)式求得压电旋转电机需要转动的步数  $\Delta x$ , 最后控制旋转电机旋转相应的步数, 激光器输出波长调谐到目标波长, 调谐精度亦为 0.1 nm。为保证激光器在长期使用过程中的调谐精度, 需要定期使用高精度波长计对(1)式中的各参量进行校准。

LabVIEW 控制程序的界面如图 8 所示。图 8 的区域 1 显示波长计的测量图谱; 区域 2 为波长设定窗口, 当目标波长值设定好后, 点击定位按钮, 激光器输出波长就会自动调谐到设定的波长值处; 区域 3 实时显示测量的波长值; 区域 4 记录并显示调谐过程中激光器输出频率(波长)的变化曲线; 区域 5 用于手动控制旋转电机; 区域 6 显示波长计不参与反馈控制时, 程序计算得到的 BRF 当前所处位置  $\varphi_0$  和目标位置  $\varphi$ , 当波长计参与反馈控制时, 此处显示的值均为 0; 区域 7 中的按钮用于辅助控制, 其中, 清空按钮用于清空记录的数据, 导出按钮用于将记录的数据导出到指定的文件夹中, 停止按钮用于停止程序。图 8 所示情况为: 目标波长值设定为 800 nm, 通过自动调谐, 激光器最终输出的波长为 800.0292 nm, 此为波长计测量的波长值, 因此, 激光器的调谐精度只能达到 0.1 nm。为了使激光器输出波长精确对应于目标波长设定值, 需要调节腔内插入的电光标准具的角度来对激光器输出波长进行精细调节, 在此基础上将标准具透射峰与谐振腔的振荡模实时锁定, 通过改变加载在 PZT 上的电压来连续调谐激光器的输出波长<sup>[13]</sup>。

通过设定不同的目标波长值, 测量了在相应工作波长时激光器的输出功率曲线(图 9)。实验结果表明,

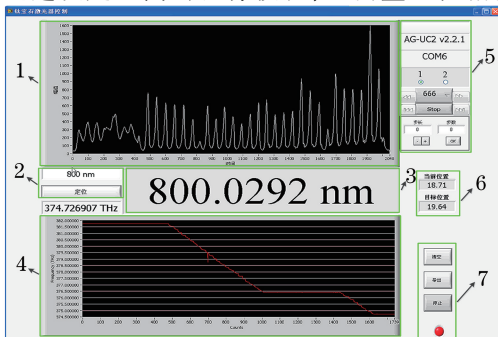


图 8 LabVIEW 控制程序的界面

Fig. 8 Interface of the LabVIEW control program

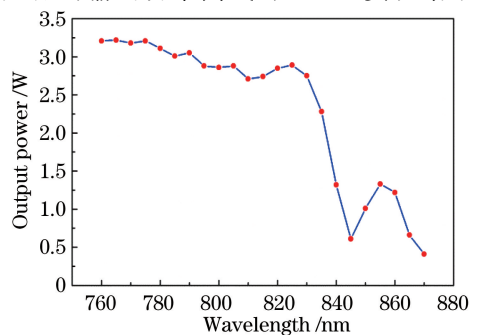


图 9 钛宝石激光器的调谐曲线

Fig. 9 Tuning curve of the Ti:sapphire laser

激光器的输出波长可由 760 nm 调谐到 870 nm,最大调谐范围可达 110 nm。从图 9 可以进一步看出,由于谐振腔腔镜镀膜的限制,所获得的自动宽调谐钛宝石激光器的最短输出波长只能达到 760 nm,而最长输出波长也只能达到 870 nm。尤其是当激光器的输出波长大于 840 nm 时,受到谐振腔腔镜镀膜的限制,钛宝石激光器的输出功率已不稳定,甚至在 845 nm 附近出现了明显的凹陷。

## 4 结 论

LabVIEW 自动控制程序与计算机的结合实现了钛宝石激光器的自动宽调谐。当激光器输出波长为 795 nm 时,最大输出功率为 2.88 W,对应的阈值抽运功率和斜效率分别为 3.58 W 和 22%,且 3.5 h 内功率稳定性优于  $\pm 0.91\%$ 。激光器输出光束质量因子  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为 1.03 和 1.12。首先基于波长计设计了反馈控制系统,实现了钛宝石激光器输出波长的自动宽调谐。为进一步简化激光器系统,基于波长计测量的系列波长值构建了腔内 BRF 的角度与激光器输出波长的一一对应关系,通过程序控制,使激光器系统不需要波长计也能实现自动宽调谐。利用设计的自动控制系统,对激光器进行自动调谐,测量得到的全固态连续单频钛宝石激光器的调谐范围为 760~870 nm。该自动宽调谐钛宝石激光器对进一步搭建自动控制系统,实现更高精度的自动可调谐钛宝石激光器具有相当重要的参考意义。

## 参 考 文 献

- [1] Kuwamoto T, Honda K, Takahashi Y, *et al.* Magneto-optical trapping of Yb atoms using an intercombination transition[J]. *Physical Review A*, 1999, 60(2): R745-R748.
- [2] Barber Z W, Hoyt C W, Oates C W, *et al.* Direct excitation of the forbidden clock transition in neutral  $^{174}\text{Yb}$  atoms confined to an optical lattice[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(8): 083002.
- [3] Xu Z, Wu Y, Tian L, *et al.* Long lifetime and high-fidelity quantum memory of photonics polarization qubit by lifting Zeeman degeneracy[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(24): 240503.
- [4] Wolgram F, Cerè A, Beduini F A, *et al.* Squeezed-light optical magnetometry[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(5): 053601.
- [5] Coherent. MBR Ring Series[Z/OL]. [2017-01-11]. <http://www.coherent.com/lasers/laser/mbr-ring-series>.
- [6] Spectra-Physics. Matisse 2 [Z/OL]. [2017-01-11]. <http://www.spectra-physics.com/products/tunable-lasers/matisse>.
- [7] M Squared. SolsTis [Z/OL]. [2017-01-11]. <http://www.m2lasers.com/lasers/all-lasers/solstis-ti-sapphire-laser.aspx>.
- [8] TekhnoScan. TIS-SF[Z/OL]. [2017-01-11]. [http://www.tekhnoscan.com/english/ring\\_lasers.htm](http://www.tekhnoscan.com/english/ring_lasers.htm).
- [9] Lu Huadong, Su Jing, Li Fengqin, *et al.* Compact, stable, tunable Ti:sapphire laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1166-1171.  
卢华东, 苏 静, 李凤琴, 等. 紧凑稳定的可调谐钛宝石激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1166-1171.
- [10] Lu Huadong. Intracavity losses measurement of the Ti:sapphire laser with relaxation resonant oscillation frequency and output power[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0402002.  
卢华东. 利用弛豫振荡频率和输出功率测量单频钛宝石激光器的腔内损耗[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402002.
- [11] Lu Huadong, Su Jing, Peng Kunchi. Study on intracavity losses and output coupler transmission of all-solid-state tunable Ti:sapphire laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2328-2333.  
卢华东, 苏 静, 彭堃堃. 全固态连续单频可调谐钛宝石激光器腔内损耗及最佳透射率的研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2328-2333.
- [12] Sun X, Wei J, Wang W, *et al.* Realization of a continuous frequency-tuning Ti:sapphire laser with an intracavity locked etalon[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(7): 071401.
- [13] Jin P, Lu H, Wei Y, *et al.* Single-frequency CW Ti:sapphire laser with intensity noise manipulation and continuous frequency-tuning[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 143-146.
- [14] Lu H, Sun X, Wang M, *et al.* Single frequency Ti:sapphire laser with continuous frequency-tuning and low intensity noise by means of the additional intracavity nonlinear loss[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24551-24558.
- [15] Lu Huadong, Su Jing, Peng Kunchi. Suppression of intensity noise at low frequencies of Ti:sapphire laser by optoelectronic control[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0402014.

- 卢华东, 苏 静, 彭堃堃. 利用光电反馈抑制钛宝石激光器低频段的强度噪声[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0402014.
- [16] Li Zhixiu, Yang Wenhai, Wang Yajun, *et al.* Optimal design of single-frequency laser system for 795 nm squeezed light source[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0902002.  
李志秀, 杨文海, 王雅君, 等. 用于 795 nm 压缩光源的单频激光器系统的优化设计[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902002.
- [17] Yin Q, Lu H, Su J, *et al.* High power single-frequency and frequency-doubled laser with active compensation for the thermal lens effect of terbium gallium garnet crystal[J]. Optics Letters, 2016, 41(9): 2033-2036.
- [18] Xing Junhong, Jiao Mingxing. Design and experimental study of tunable dual-frequency Nd:YAG laser with large frequency difference[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 051402.  
邢俊红, 焦明星. 大频差可调谐双频 Nd:YAG 激光器设计与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 051402.
- [19] Li Huijuan, Zhang Miao, Li Fengqin. High-power single-frequency 461 nm generation from an intracavity doubling of Ti:sapphire laser with LBO[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0302003.  
李慧娟, 张 森, 李凤琴. 高功率单频 LBO 腔内倍频 461 nm 钛宝石激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0302003.
- [20] Lu Huadong. Investigation on CW single-frequency tunable Ti:sapphire laser with its intensity noise[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2011: 49-56.  
卢华东. 连续单频可调谐钛宝石激光器及其强度噪声特性的研究[D]. 太原: 山西大学, 2011: 49-56.