网络首发：

标题：全自动可调谐单频连续波钛宝石激光器
作者：王天阳,王永东,靳丕钰,苏静,卢华东
收稿日期：2025-06-03
录用日期：2025-07-01
DOI：10.3788/CJL250888

引用格式：
王天阳,王永东,靳丕钰,苏静,卢华东. 全自动可调谐单频连续波钛宝石激光器[J].中国激光,2026,53(11):1101001.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别，请以正式出版文件为准！

---

您感兴趣的其他相关论文：

激光辅助射流电化学抛光GH3044合金实验研究
吴国龙 沈杰 黄煜杰 杨珍珍 王晔 田懿 姚建华
浙江工业大学激光先进制造研究院，浙江 杭州 310023
中国激光,2024,51(20):2002207

6061铝合金表面激光粗化技术研究
李春 杜欣蔚 杜宝宪 张子昌 马康智 李婷 倪立勇 曾一兵
航天材料及工艺研究所表面工程事业部，北京 100176
中国激光,2024,51(16):1602206

钕离子掺杂硅酸镓钙铌晶体的生长和激光性能研究
张琮 夏聪 马世会 于永贵 胡章贵 叶宁 王继扬 吴以成
天津理工大学材料科学与工程学院功能晶体研究院，天津 300384
中国激光,2023,50(22):2201009

基于多步相位恢复的激光远场焦斑测量方法
陈晓义 段亚轩 王拯洲 袁索超 达争尚
中国科学院西安光学精密机械研究所先进光学仪器研究室，陕西 西安 710119
中国激光,2022,49(7):0704002

基于Elman神经网络的不锈钢微秒激光着色预测
张龙达 李好发 安丰硕 王志文 郑宏宇
山东理工大学机械工程学院，山东 淄博 255000
中国激光,2022,49(8):0802010

# 全自动可调谐单频连续波钛宝石激光器

王天阳[1]，王永东[1]，靳丕锴[1,2]*，苏　静[1,2]，卢华东[1,2]

[1]山西大学光电研究所光量子技术与器件全国重点实验室，山西 太原 030006;

[2]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 FPGA 的全自动可调谐单频连续波钛宝石激光器,根据激光器工作原理，通过对激光谐振腔内选模调谐元件双折射滤波片(BRF)和标准具(Etalon)以及控制谐振腔腔长的压电陶瓷(PZT)的联动控制，实现了连续单频钛宝石激光器输出波长的自动精准控制。该控制系统以波长计实时采集的波长值为参考，根据设定的目标波长值依次自动控制 BRF、Etalon、PZT，将激光器输出波长逐次调谐至目标波长处，调谐精度达 0.0001nm。

**关键词** 激光；钛宝石激光器；单频连续波激光；FPGA；LabVIEW；全自动控制

**中图分类号** TN248.1　　**文献标识码** A

## 1 引　言

全固态单频连续波可调谐钛宝石激光器因具有各项优良特性和综合性能优势，在量子光学[1]、精密测量[2]、高分辨率光谱学[3]、冷原子物理[4]等领域具有很重要的应用价值。随着芯片集成技术的不断发展，钛宝石激光器系统逐渐向小型化[5-10]、片上集成光源[11,12]发展，并于 2024 年成功实现了功率为 1.8 mW、调谐范围>50 nm（840 nm-900 nm）、连续无跳模调谐范围为 36.4 GHz、线宽为 140 kHz 的片上集成单频连续波可调谐钛宝石激光器[12]，但是仍处于起步阶段，无法满足实用化需求。目前，基础科学研究与应用领域使用的钛宝石激光器系统主要还是以高功率固体绿光激光器泵浦的桌面式自由空间全固态单频单频连续波可调谐激光器，当前市面上主要有 Sols Tis @M Squared Lasers (英国)[13]、Matisse 2 @SpectraPhysics (美国)[14]、MBR110 @Coherent (美国)[15]和 TiS-SF @Tekhnoscan (俄罗斯)[16]系列激光器产品，并逐渐形成了差异化的技术布局。而国内对该类型激光器的研究起步较晚[17,18]，自 2008 年起，山西大学卢华东课题组以自研的高质量 532 nm 绿光激光器[19]作为泵浦源，展开对全固态单频连续波可调谐钛宝石激光器的研发和制作工作，并逐步提升激光器的整体性能。首先，发展了一种可覆盖 300 nm 宽带调谐的双折射滤波片设计方法[20]，通过设计四片式离轴双折射滤波片实现了调谐范围为 700 nm-1000 nm 的宽带可调谐激光器，在此基础上利用钛宝石晶体自身的双折射效应，将其既作为增益介质，又作为双折射滤波片，实现了输出功率达瓦级，调谐范围达 100 nm 的结构紧凑型自调谐钛宝石激光器[21]，然后发展了一系列先进的标准具锁定技术和方法，包括基于压电陶瓷的机械式调制锁定技术[22]、基于电光晶体的电光效应调制锁定技术[23]、基于双折射晶体的

**基金项目**：国家重点研发计划（2022YFC2204003）；国家自然科学基金（62205186）；山西省省筹资金资助回国留学人员科研项目（2022-015）；山西省科技创新人才团队(202204051002005)；第一实验室-国创中心（山西）科技创新项目

**通信作者**：*E-mail：pxjin@sxu.edu.cn

无调制锁定技术[24]以及基于差分探测的泵浦源噪声免疫锁定技术[25],实现了全固态单频连续波激光器的连续调谐。进一步地,发展了自注入锁定的激光器单向行波运转技术，在保证高输出功率与高效率的同时实现了自注入单频连续波可调谐钛宝石激光器[26]。

由于钛宝石晶体具有较宽的荧光光谱，通常在基于单向行波模式的钛宝石激光器环形谐振腔中采用两级模式选择元件——双折射滤波片（BRF）和标准具（Etalon），获得稳定的单纵模激光输出，其中，前者（BRF）负责模式的初步筛选，后者（Etalon）则用于高精度单纵模选择。在激光器运行过程中，可通过旋转双折射滤波片的方位角从而对激光器输出波长进行大范围粗调，并通过调节标准具的角度实现钛宝石激光器输出波长的精细调谐，同时通过控制谐振腔内安装的压电陶瓷扫描激光谐振腔腔长从而实现激光器输出激光频率的精准控制。因此，该类型激光器在使用过程中，需要分别控制腔内双折射滤波片、标准具以及安装腔镜的压电陶瓷。因此该类型激光器在使用过程中的操作比较繁琐复杂，也对激光器的使用人员提出了更高的要求，在使用之前需要进行一定程度的专业技能培训，即使掌握了一定专业技能的科研人员，在使用过种中也会因不可避免的人为操作失误导致全固态单频连续波钛宝石激光器无法正常运行，甚至损坏。目前占据市场主导地位的英国 M Squared Lasers 公司[13]和美国 Spectra-Physics 公司[14]均开发出搭配对应激光器的自动控制系统，实现激光输出波长的完全自动化控制。然而受限于国外技术封锁，以上自动控制器无法直接应用于我们自主研发的高质量全固态单频连续波可调谐钛宝石激光器中。近年来，现场可编程门阵列（FPGA, Field Programmable Gate Array）因其超低延迟控制、多通道并行信号处理等优点，被广泛应用于激光器控制等光学控制领域[27-30]。为了有效提升激光器整体性能，本论文基于 FPGA+LabVIEW 设计了钛宝石激光器自动控制系统，实现了全自动可调谐的单频连续波钛宝石激光器。通过数字化控制系统设计实现了对谐振腔内双折射滤波片、标准具与压电陶瓷的联动调控机制，从而实现激光器输出波长的一键精准控制。在实际控制过程中，通过在上位机控制界面内输入目标波长值并点击“自动校准”按钮，控制系统根据波长计实时采集到的波长值与设定的目标波长值不断进行比较，从而依次自动控制双折射滤波片、标准具和压电陶瓷，在无需人为干预的情况下，将激光器的输出波长自动调谐至目标波长处。实验中，利用设计的全自动控制系统将全固态单频连续波激光器的输出波长从 800.0000 nm 自动调谐至 752.0000 nm，调谐精度可达 0.0001 nm。

## 2 全自动可调谐单频连续波钛宝石激光器系统设计

实验所设计的激光器系统如图 1 所示。采用由太原山大宇光科技有限公司自主研发的高功率全固态单频 532 nm 激光器作为泵浦源激光器，其输出的激光经过透镜 $f_1$（200 mm）和 $f_2$（120 nm）后聚焦在钛宝石晶体的中心，同时利用半波片（HWP）调节泵浦激光的偏振方向，使其与钛宝石晶体的$\pi$偏振吸收方向匹配，

实现最高泵浦吸收效率。谐振腔采用四镜 8 字环形腔结构，由两片 100 nm 曲率半径的平凹反射镜（$M_1$、$M_2$）与两片平面镜（$M_3$、$M_4$）构成。激光增益介质钛宝石晶体（Φ4 mm×20 mm，两端面布氏角切割，0.05 wt%）置于腔镜 $M_1$ 和 $M_2$ 之间的腰斑位置处。由于在产生激光过程中，钛宝石晶体会产生大量的热，所以将其置于循环冷却水中进行散热。此外，还在激光谐振腔内插入宽带隔离器（OD），使腔内振荡激光以单向行波方式运转，并放置双折射滤波片（BRF）和标准具（Etalon），实现钛宝石激光器的稳定单频运转。宽带隔离器OD由磁致旋光晶体TGG和石英旋光片构成。BRF由四片石英晶片[19]构成，其厚度分别为0.5 mm、1 mm、2.5 mm、4.5 mm（1:2:5:9），并以布儒斯特角（57°）插入谐振腔内。标准具采用厚度为 0.5 mm，两平行面镀有反射率为 20 % @700 - 1000 nm 反射膜的融熔石英片。通过调节双折射滤波片光轴与腔内振荡光偏振方向间的夹角以及标准具的入射角即可对钛宝石激光器输出波长进行宽范围粗略调谐（大于百纳米）和小范围精细调谐（0.4 nm，取决于标准具厚度）。谐振腔腔镜安装在压电陶瓷（PZT）上，通过 PZT 的伸缩调节激光谐振腔腔长。PZT 由一伸缩量大于 20 μm 的长程压电陶瓷 $PZT_1$（型号：HPSt 150/14-10/55）和一伸缩量小于 10 μm 的短程压电陶瓷 $PZT_2$（型号：HPSt 500/10-5/7）粘接在一起构成，$PZT_1$ 用于大范围调节激光谐振腔腔长，$PZT_2$ 则用于精细调节腔长。当激光谐振腔振荡模式与标准具透射峰锁定在一起后，通过控制压电陶瓷即可实现激光输出波长的连续无跳模调谐，进而精确控制激光波长。激光器输出的一小部分光束经分束镜反射后耦合进绝对精度为 30 MHz，波长偏差灵敏度为 1 MHz 的波长计中。其型号为 High Finesse Laser and Electronic Systems 公司的 WS7 系列波长计，通过此高精度波长计，可实时测量激光器输出光束的波长值。

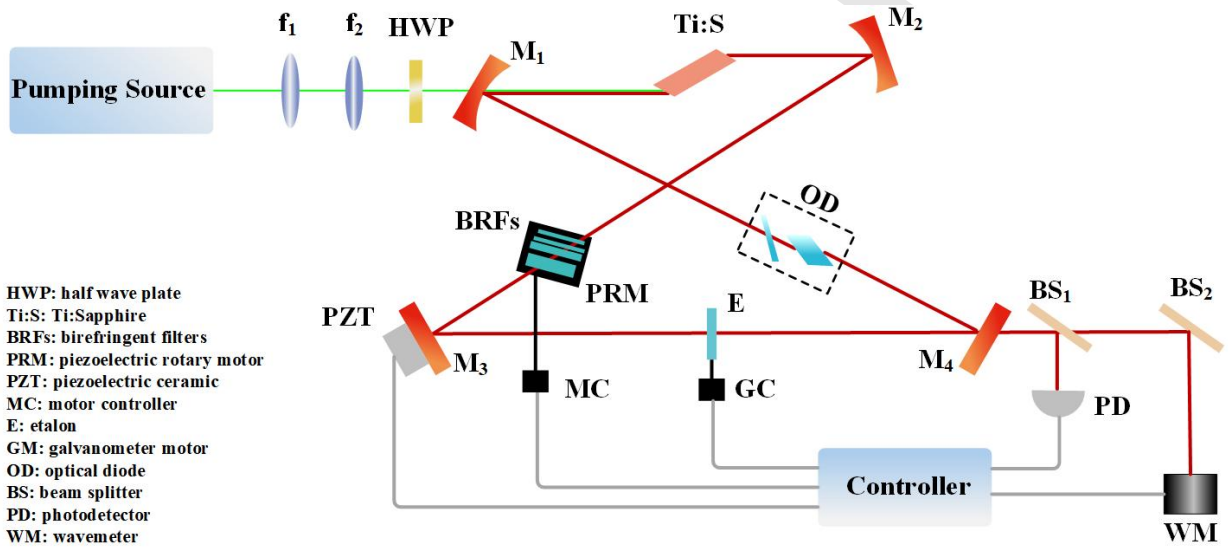


图 1 全自动调谐钛宝石激光器系统

Fig. 1 Schematic of automatically tunable Ti : sapphire laser

全固态单频连续波可调谐钛宝石激光器全自动控制系统的功能框图如图 2 所示。由波长计实时采集激光器输出波长,并由系统程序读取测量的波长值,然后通过数值和图表的方式显示在计算机中，根据此波长值

对腔内各元件进行控制。首先通过调节双折射滤波片实现激光波长的粗调，双折射滤波片安装在一个压电旋转平台（AG-PR100）中，通过配套的压电控制板对此平台进行控制，压电控制板通过串口通信的方式与计算机连接，通过上位机程序发送控制信号驱动压电旋转平台，可沿轴向改变双折射滤波片的角度从而实现激光波长的宽调谐[31]。在控制双折射滤波片的基础上，通过调节腔内标准具的角度实现激光波长的精细调节并锁定标准具，标准具安装在振镜电机上，通过加载相应的控制信号至振镜电机的控制板上实现标准具的角度控制[32]，标准具的锁定控制系统主要在 FPGA 中实现。具体为，利用直接数字频率合成（DDS, Direct Digital Synthesis）技术在 FPGA 内部生成两路相同频率，相对相位可调的 1kHz 正弦信号；一路作为调制信号直接作用于标准具，调制腔内光场，利用光电探测器探测被调制的光场信号，由 ADC 对光电探测器探测到的 1 kHz 的电信号进行采集，由于采集到的探测信号中含有其他频率的信号，不利于对信号进行观测，因此通过调用 Xilinx IP 核，生成了中心频率为 1 kHz 的带通滤波器，提取出探测信号中 1 kHz 的信号；经过去除噪声后的探测信号与另一路作为解调信号的 1 kHz 正弦信号进行混频，混频后的信号再经过一个用 Xilinx IP 核生成的 2 kHz 的低通滤波器以滤掉混频产生的高频部分，此时提取出的信号经一个控制算法模块处理后，生成最终用于锁定标准具的控制信号。设置一个输入控件作为直流偏置信号控制产生电压范围为 ±5V 的直流输出信号用于调节标准具的角度。将上述直流偏置信号、调制信号与控制信号叠加输出至装有标准具的振镜电机的控制板，通过计算机下发指令调节标准具角度并对其进行锁定，此外，在计算机控制界面上设置波形图表，通过 PCIe 通讯接口将实时生成的调制解调信号、误差信号以及加载至标准具的信号数据上发至计算机，并实时显示。

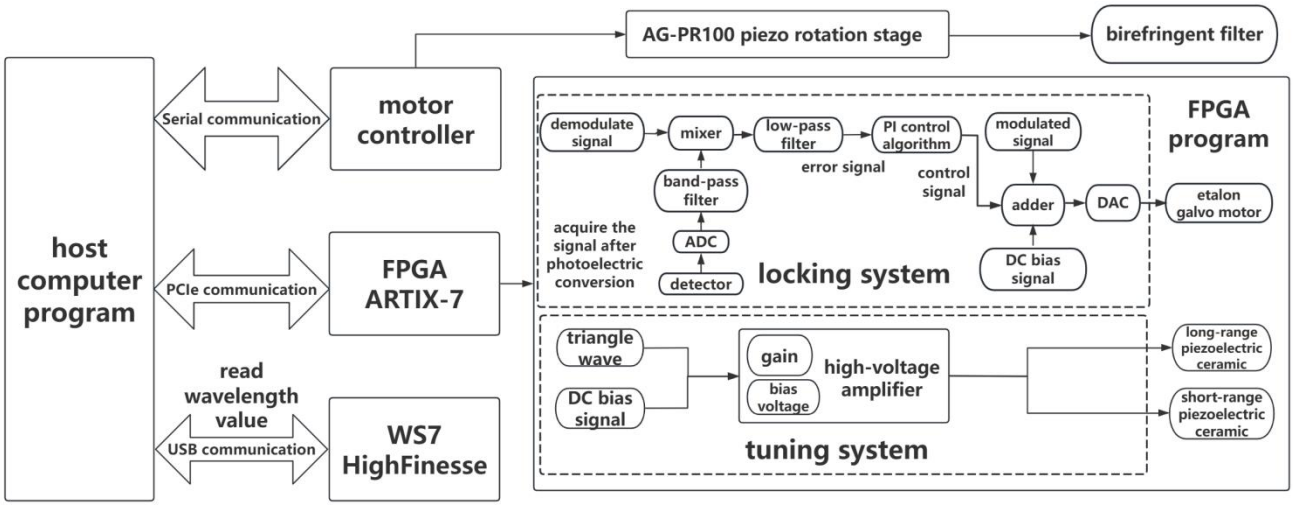


图 2 钛宝石激光器控制系统结构框图

Fig. 2 The block diagram of the Ti : sapphire laser control system

当腔内标准具锁定后，为了将激光器输出波长精确调谐到某一波长值处，还需要给激光器中粘连在谐振腔腔镜 $M_3$ 上的压电陶瓷施加电压，从而实现连续调谐。首先通过 FPGA 和 DAC 输出一个幅度可调节范

围为 0~5 V，频率可调节范围为 0.01~100 Hz 的三角波和一个幅度可调节范围为 0~5 V 的直流信号输出至控制器内部的高压放大部分，作为扫描信号驱动 $PZT_1$，连续扫描激光谐振腔的腔长，实现输出波长的连续调谐。当波长精确调节至目标波长后，以激光器实时输出波长与目标波长的偏差值为误差信号，经 PID 模块生成控制信号，控制短程压电陶瓷 $PZT_2$，实现激光波长的稳定控制。

控制系统的控制程序分为上位机（PC 端）控制程序与下位机（FPGA）控制程序两部分，均通过 LabVIEW 进行编写。其中，中间层驱动和上位机 PC 端一般都可以使用 LabVIEW 直接进行开发。而下位机 FPGA 如果涉及到 PCIe DMA 这类复杂的通信协议，里面的 PCIe 代码若采用 VHDL 或者 Verilog 语言进行编写难度较大，使得开发难度和工作量会非常大。Xillybus 公司推出的 Xillybus FPGA PCIe DMA 驱动 IP 核把复杂的 FPGA PCIe DMA 通信技术进行封装，将 Xilinx 的 PCIe IP 核集成在内，并基于四线握手协议，利用 FIFO 缓冲接口和 TX/RX 的数据收发通道将数据发送至 FPGA。用户可以直接在 FPGA 调用 Xillybus 提供的收发 FIFO 接口，将数据发送到上位机或者接收上位机下发的数据，上位机只需要通过打开被系统识别出来的名为 Xillybus 的 PCIe 设备，然后调用标准的文件读写函数，进行文件读写即可控制底层 FPGA 芯片里面的 FIFO 数据的收发。此外，下位机还涉及到一系列数字信号处理，用 Verilog 或 VHDL 语言实现较为繁琐，下位机代码通过 LabVIEW 编程并转换为 dcp 网表文件后添加至 VIVADO 工程中，配置 Xillybus IP 核使下位机与上位机接口进行映射，实现信号的传递，从而缩减了代码量，增加了程序的可读性和易操作性。

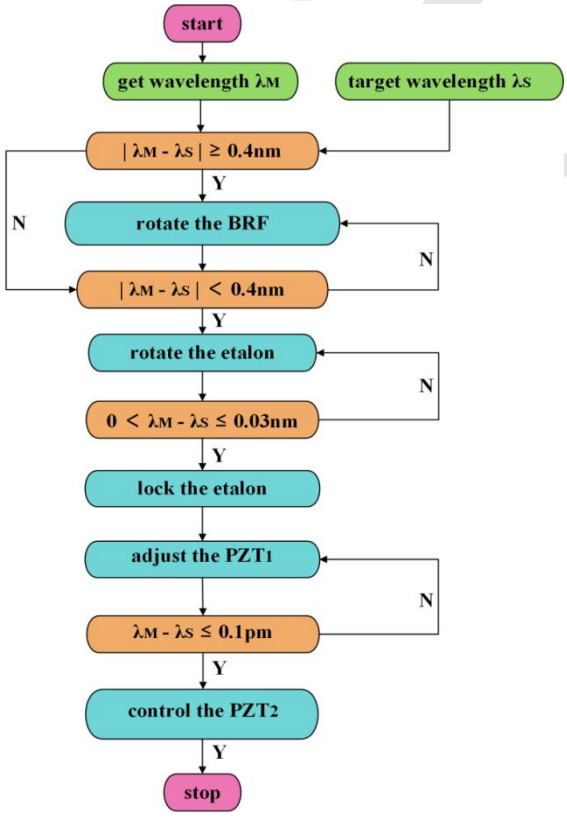


图 3 自动控制流程图

Fig. 3 The automatic control flow chart

在以上设计基础上，通过程序设计实现了全固态单频连续波可调谐钛宝石激光器输出波长的自动精准调节，自动控制程序流程图如图 3 所示。设定目标波长值 $\lambda_S$，程序将不断计算实时波长值 $\lambda_M$ 与目标波长值的差值，逐步控制双折射滤波片、标准具、压电陶瓷。首先程序控制安装有双折射滤波片的压电旋转电机旋转，根据激光器特性，每转动一次电机，输出波长会变化 0.4 nm（取决于激光器系统采用的标准具的厚度），当$|\lambda_M - \lambda_S| <= 0.4$ nm 时停止转动电机。接着程序通过改变锁定系统中的直流偏置信号控制安装有标准具的振镜电机，改变标准具的角度，由于在钛宝石激光器整个自动控制过程中，标准具的自动调节及自动锁定是非常重要的一环，其直接决定了后续连续精准调节激光器输出波长能否实现，所以在程序设计过程中需要根据激光器的运转原理及标准具的调谐特性对标准具的控制进行精细化设计。理论上，当调节安装双折射滤波片的旋转电机至$|\lambda_M - \lambda_S| <= 0.4$ nm 时，通过调节标准具的角度，可使 $\lambda_M$ 逐渐靠近目标波长值 $\lambda_S$，但是，在实际调节过程中，在标准具调谐范围内并不一定包含有目标波长，主要取决于双折射滤波片停止调节后其透射峰与标准具透射峰之间的相对位置。因此在激光器输出波长自动控制过程中，为了实现一键自动精准调谐至任意波长（调谐范围内）的目标，需要反复优化调节双折射滤波片及标准具的角度，针对此，我们设计了如图 4 所示的控制算法，首先从 0 开始自动遍历施加在振镜电机上的直流偏置电压不断旋转标准具角度，直至出现输出波长的跳变（若前一次采集的波长值与后一次采集的波长值的差值大于 0.2 nm，就认为输出波长出现跳变）。此时程序会寄存跳变前后的波长值并求出这两个波长值的平均值 $\lambda_A$，接着进行判断，若$|\lambda_M - \lambda_A| >= 0.05$ nm 会返回双折射滤波片的控制状态继续转动压电旋转电电机调整双折射滤波片角度，若 $\lambda_M - \lambda_A >= 0.05$ nm 将电机正转 2 步，若 $\lambda_M - \lambda_A <= -0.05$ nm 则将电机反转 2 步，直至$|\lambda_M - \lambda_A| <= 0.05$nm 时程序再次从 0 开始遍历 DC 的数值，当满足 $0 < \lambda_M - \lambda_S <= 0.03$ nm（主要取决于压电陶瓷 $PZT_1$ 的调谐范围，约为 0.1 nm，为了保证系统可实现稳定精准控制，该值可灵活调整，一般可取 0.01 nm 左右）时停止改变直流偏置信号并打开 PI 锁定开关，锁定标准具。

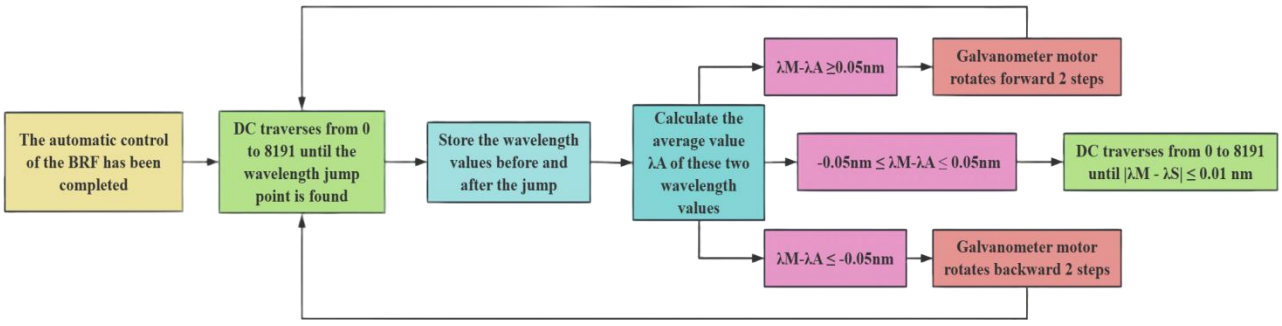


图 4 标准具自动控制算法

Fig.4 Automatic etalon control algorithms

当标准具锁定后，程序通过改变调谐系统中的直流电压，通过高压放大模块接入长程压电陶瓷，控制压电陶瓷伸缩从而改变输出波长，当满足 $\lambda_M - \lambda_S <= 0.1$ pm 时停止改变直流电压，此时程序会打开控制短程压电陶瓷的 PID 模块动态稳定激光波长，实现对输出波长的一键精准控制。

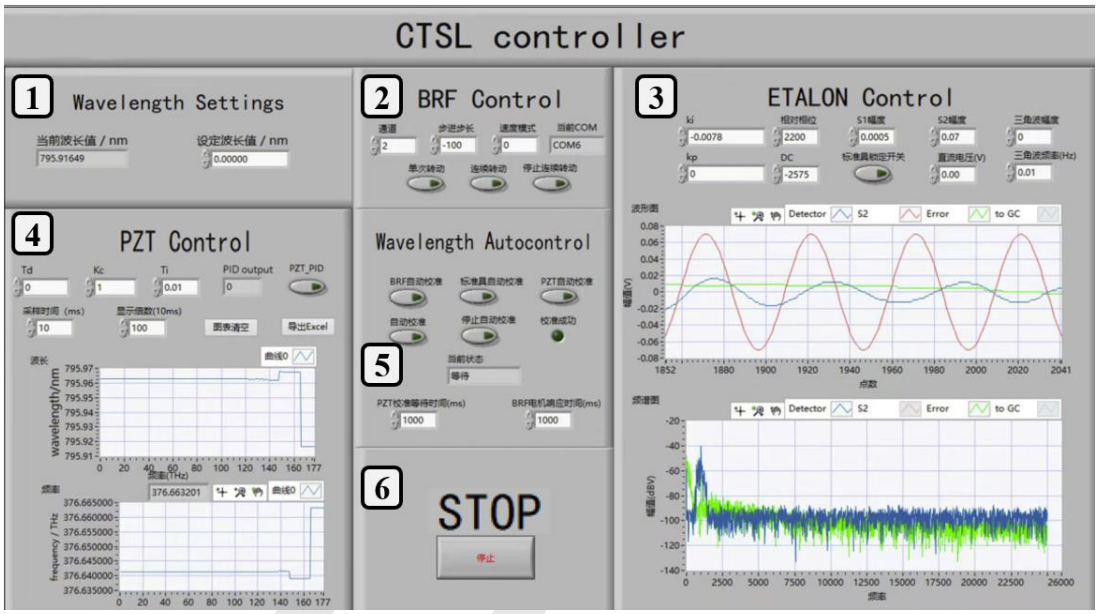


图 5 控制程序界面

Fig. 5 Host Computer Control Interface

激光器全自动控制系统相应的上位机控制界面如图 5 所示，分为波长显示、BRF 控制、Etalon 控制、PZT 控制、波长自动控制五部分，用于监测实时波长数据、探测信号、误差信号、控制信号并用于向下位机及电机下发指令。区域 1 为波长值设定部分，包括设定波长和读取波长的功能；区域 2 为双折射滤波片的控制部分，可控制压电旋转电机单次步进或连续步进自定义步长；区域 3 为标准具的控制部分，包含锁定模块、幅度可调的调制解调信号、直流偏置信号、频率幅度可调的三角波信号及虚拟示波器；区域 4 为长程压电陶瓷、短程压电陶瓷的控制部分，包括 PID 稳频模块及虚拟波形图；区域 5 为波长值自动控制部分，点击自动校准后，程序会依次控制压电旋转电机、振镜电机及长程压电陶瓷、短程压电陶瓷，直至当前波长值与目标波长值的差值≤ 0.1 pm 时停止自动校准，还可单独控制，实现各部分单独的自动校准；区域 6 为停止程序部分。

## 3 实验测试结果与分析

当设计的全固态单频连续波可调谐钛宝石激光器稳定运行后，分别利用光功率计（PM100D，Thorlabs，美国）、波长计和光束质量分析仪（M2SETVIS，Thorlabs，美国）等仪器测量了激光器的输出功率及其稳定性、光束质量、调谐范围和连续调谐范围等各项光学性能指标，具体如图 6 所示。激光器最高输出功率为 5.6 W，此时对应泵浦功率为 19.9 W，且在阈值泵浦功率 2.5 W 之后，激光器输出功率随泵浦功率线性增加，增加的斜效率为 33.7 %，如图 6（a）所示。当激光器输出功率达到最大并稳定运行后，记录了其在 3 小时内的功率波动，如图 6（b）所示，其峰峰值功率波动＜±0.94 %。图 6（b）中插图展示了测量到的激光器输出光束的横向光场分布图，对应的 x 方向和 y 方向的 $M^2$ 因子分别为 1.03 和 1.12。在此基础上，通过

调节双折射滤波片的角度实现了激光器输出波长在 692 nm-955 nm（263 nm）范围内的宽范围调谐，如图 6（c）所示，由于在该调谐过程中没有同步调节标准具，同时叠加钛宝石晶体在不同波长处的增益起伏，所以在调谐过程中部分波长处的激光功率低于附近其他波长的功率。在激光器输出波长为 795 nm 处利用设计的全数字化自动控制系统反馈锁定标准具，并给长程压电陶瓷 $PZT_1$ 施加高压扫描信号后，实现了激光器输出波长的连续调谐，如图 6（d）所示，连续扫描范围为 34 GHz。将激光器输出波长分别调谐至 766 nm、780 nm、812 nm 时，分别实现了 30 GHz、 31 GHz、32 GHz 的连续调谐。

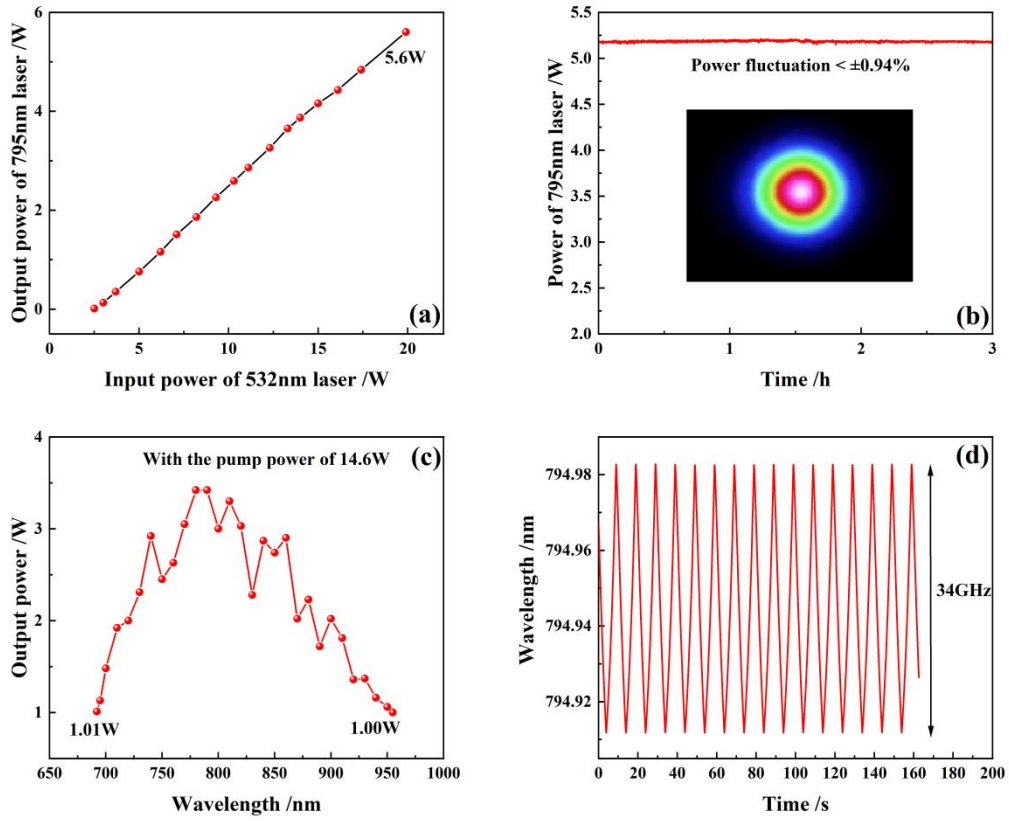


图 6 激光器输出参数

Fig. 6 various output parameters of Ti : sapphire laser

在此基础上，通过在激光器自动控制系统的控制界面中“设定波长值”窗口设定目标波长值并点击“自动校准”控制键后，可实现激光器输出波长的一键自动精准调节。自动调节过程中，激光器输出波长的变化曲线如图 7 所示，初始时刻激光器输出波长为 800.0000 nm，设定的目标波长值为 752.0000 nm。波长自动校准程序启动后，控制程序根据目标波长值与当前波长值的偏差，首先发送指令使控制系统中装有 BRFs 的电机旋转，从而快速实现波长粗调（图 7 中区域 I 所示）。激光器波长达到 752.3187 nm 时，程序自动进入标准具校准状态，此时程序自动循环改变施加至标准具振镜电机的电压从而改变标准具的角度，寻找合适的角度将 Etalon 的透射峰与激光谐振腔的振荡模进行实时锁定（图 7 中区域 II 所示）。当输出波长调节至 752.0068 nm 时锁定标准具，然后程序自动改变施加至长程压电陶瓷 $PZT_1$ 的电压，连续调节谐振腔的腔长，

将激光器的输出波长精确调谐到 752.0000 nm 处（图 7 中区域 III 所示），此时打开激光稳频开关，通过反馈控制短程压电陶瓷 $PZT_2$ 进行稳频。整个波长自动校准过程历时约 4.2 min。为验证控制系统的稳定性和可靠性，在其调谐范围内随机选取不同的目标波长进行自动控制测试，实现了从 760 nm-800 nm、780 nm-810 nm、800 nm-780 nm、830 nm-795 nm 的全自动控制。

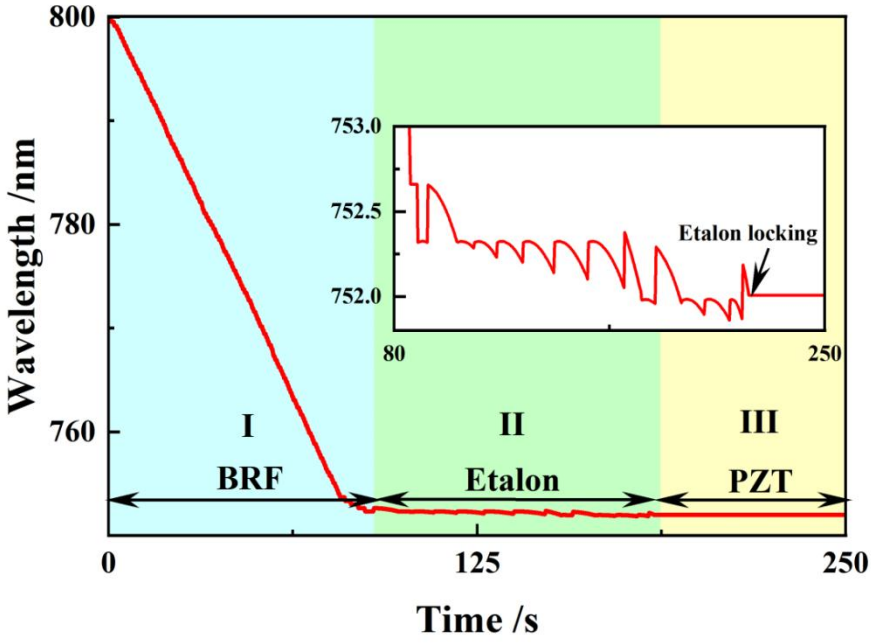


图 7 从 800.0000nm 至 752.0000nm 的全自动连续精准调谐曲线

Fig. 7 The full-automatic continuous tuning curve from 800.0000 nm to 752.0000 nm

# 4 结　论

本文设计并实现了一种全自动可调谐单频连续波钛宝石激光器，激光器对应阈值泵浦功率为 2.5 W，最高输出功率为 5.6 W，斜效率为 33.7 %，最大调谐范围为 263 nm（692 nm- 955 nm），连续调谐范围 ＞30 GHz。结合 LabVIEW 程序与 FPGA 硬件，设计了一个高效、稳定的全自动激光器控制系统，通过对光学元件双折射滤波片、标准具及压电陶瓷的全自动联动控制，实现激光器输出波长的一键精准调节。实验过程中，通过设定目标波长为 752.0000 nm，并利用“自动校准”一键控制，激光器的输出波长在不到 5 min 的时间内从初始的 800.0000 nm 自动精准调节至目标波长 752.0000 nm。在此基础上，还实现了从 760 nm-800 nm、780nm-810 nm、800 nm-780 nm、830 nm-795 nm 的全自动控制，整个调节过程无需任何人为干预，极大地提高了全固态单频连续波钛宝石激光器的操作便捷性及可靠性。

# 参考文献


[1] Kimble H J. The quantum internet[J]. Nature, 2008, 453(7198): 1023-30.

[2] LI B B, Bilek J, Hoff U B, et al. Quantum enhanced optomechanical magnetometry[J]. Optica, 2018, 5(7): 850-856.

[3] Wim V, Claus Z, Reinald K, et al. A frequency-stabilized titanium sapphire laser for high-resolution spectroscopy[J]. Optics Communications, 1990, 75(5-6): 435-440.

[4] Barber Z, Hoyt C W, Oates C W, et al. Direct excitation of the forbidden clock transition in neutral $^{174}$Yb atoms confined to an optical lattice[J]. Physical review letters, 2006, 96 (8): 083002.

[5] Anderson A A, Eason R W, Hickey L M, et al. Ti:sapphire planar waveguide laser grown by pulsed laser deposition[J]. Optics letters, 1997, 22(20): 1556-8.

[6] Pollnau M , Grivas C , Laversenne L ,et al.Ti:Sapphire waveguide lasers[J].Laser Physics Letters, 2010, 4(8):560-571.

[7] Grivas C, Corbari C, Brambilla G, et al. Tunable, continuous-wave Ti:sapphire channel waveguide lasers written by femtosecond and picosecond laser pulses[J]. Optics Letters, 2012, 37(22):4630-2.

[8] Yang T T, Yang T I, Soundararajan R, et al. Widely Tunable, 25-mW Power, Ti:sapphire Crystal-Fiber Laser[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2019, 31(24):4.

[9] Azeem F, Trainor L S, Gao A, et al. Ultra-Low Threshold Titanium-Doped Sapphire Whispering‐Gallery Laser[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(8).

[10] 杜琳, 李培炎, 黄滋宇, 杨明, 吴晓君. 半导体直接泵浦钛宝石超快激光振荡器驱动的自旋太赫兹发射光谱系统（特邀）[J]. 光学学报, 2024, 44(17): 1732025.
Du L, Li P Y , Huang Z Y , Yang M , Wu X J . Spintronic Terahertz Emission Spectroscopy System Driven by Direct Diode Pumped Ti ： Sapphire Ultrafast Oscillator (Invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(17): 1732025.

[11] Wang Y B, Holguín-Lerma J A, Vezzoli M, et al. Photonic-circuit-integrated titanium:sapphire laser[J]. Nature Photonics, 2023, 17(4): 338-345.

[12] Yang J, Gasse K V, Lukin D M, et al. Titanium:sapphire-on-insulator integrated lasers and amplifiers[J]. Nature, 2024, 630(8018):853-859.

[13] http://www.m2lasers.com/lasers/all-lasers/solstis-ti-sapphire-laser.aspx.

[14] http://www.spectra-physics.com/products/tunable-lasers.

[15] http://www.coherent.com/lasers/laser/mbr-ring-series.

[16] http://www.tekhnoscan.com/english/ring_lasers.htm.

[17] 魏娇, 靳丕锖, 苏静, 卢华东, 彭堃墀. 全固态单频连续波宽调谐钛宝石激光器研究进展（特邀）[J]. 光电技术应用, 2023, 38(5): 0019.
Wei J, Jin P X, Su J, Lu H D, Peng K C. All-solid-state Single-frequency Continuous-wave Wideband Tunable Titanium Sapphire Laser (Invited)[J]. Electro-Optic Technology Application, 2023, 38(5): 0019.

[18] Ma Y J, Zhou X X, Wang Y T, et al. Optimizing the output power of CW Ti:sapphire laser by stable region analysis and adjustment impact observation[J]. Optics and Laser Technology, 2025, 181(PC): 111946-111946.

[19] Yin Q W, Lu H D, 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): 2033-6.

[20] Wei J, Cao X C, Jin P X, et al. Diving angle optimization of BRF in a single-frequency continuous-wave wideband tunable titanium:sapphire laser[J]. Optics express, 2021, 29(5): 6714-6725.

[21] Wei J, Cao X C, Jin P X, et al. Realization of compact Watt-level single-frequency continuous-wave self-tuning titanium: sapphire laser[J]. Optics express, 2021, 29(2): 2679-2689.

[22] Sun X J, Wei J, Wang W Z, et al. Realization of a continuous frequency-tuning Ti:sapphire laser with an intracavity locked etalon[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(07): 71-74.

[23] Jin P X, Lu H D, Wei Y X, et al. Single-frequency CW Ti:sapphire laser with intensity noise manipulation and continuous frequency-tuning[J]. Optics letters, 2017, 42(1): 143-146.

[24] Jin P X, Wei J, Su J, et al. Recent progress in continuously tunable low-noise all-solid-state single-frequency continuous-wave laser based on intracavity locked etalon[J]. Frontiers in Physics, 2022,10

[25] Song J Q, Qin J L, Jin P X, et al. Realization of CW single-frequency tunable Ti:sapphire laser with immunity to the noise of the pump source[J]. Optics express, 2023, 31(1): 745-754.

[26] Wei Y X, Lu H D, Jin P X, et al. Self-injection locked CW single-frequency tunable Ti:sapphire laser[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21379-21387.

[27] 陈震, 张琦, 柯尊灵, 吴昺炎, 刘后, 欧琢璐, 张小贝. 光纤水听器移频正交拟合解调方案及其 FPGA 设计[J]. 中国激光, 2025, 52(6): 0606001.
Chen Z , Zhang Q, Ke Z L, Wu B Y, Liu H, Ou Z L, Zhang X B. Frequency-Shift Quadrature-Fitting Demodulation Scheme and FPGA Design for Fiber-Optic Hydrophone[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(6): 0606001.

[28] 张卓宇, 蒋林, 陈博阳, 冯国豪, 冯家城, 闫连山. 基于深度学习的光电振荡混沌系统建模及 FPGA 应用[J]. 光学学报, 2024, 44(19): 1906002.
Zhang Z Y, Jiang L, Chen B Y, Feng G H, Feng J C, Yan L S. Modeling and FPGA Application of Optoelectronic Oscillation Chaotic System Based on Deep Learning[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(19): 1906002.

[29] 陈洋, 乔丽君, 曹康怡, 范卜文, 郭浩森, 秦嘉辰, 李健, 张明江. 基于 FPGA 的拉曼分布式光纤测温系统数据采集处理模块设计[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(17): 1706007.
Chen Y, Qiao L J, Cao K Y, Fan B W, Guo H S, Qin J C, Li J, Zhang M J. Design of Data Acquisition and Processing Module for Raman-Distributed Optical-Fiber Temperature Measurement System Based on FPGA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(17): 1706007.

[30] 马国龙, 程治, 唐昌鹏, 王怡婷, 管世健, 方涛, 卢林林, 张云山, 陈向飞. 基于 FPGA 的线性调频分布式反馈激光器实时非线性校正技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(23): 2314003.
Ma G L, Cheng Z, Tang C P, Wang Y T, Guan S J, Fang T, Lu L L, Zhang Y S, Chen X F. Real-Time Nonlinear Correction Technology of Linear Frequency Modulation Distributed Feedback Laser Based on FPGA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(23): 2314003.

[31] 苏静, 靳丕锖, 卫毅笑, 卢华东, 彭堃墀. 自动宽调谐的全固态连续单频钛宝石激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0701006.
Su J, Jin P X, Wei Y X, Lu H D, Peng K C. Automatically and Broadly Tunable All-Solid-State Continuous Single-Frequency Ti：Sapphire Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0701006.

[32] Li F Q, Zhao B, Wei J, et al.Continuously tunable single-frequency 455 nm blue laser for high-state excitation transition of cesium.[J].Optics letters,2019,44(15):3785-3788.

# Fully Automated Tunable Single-Frequency Continuous-Wave Ti:Sapphire Laser

*Wang Tianyang[1], Wang Yongdong[1], Jin Pixian[1,2] *, Su Jing[1,2], Lu Huadong[1,2]*

[1] *State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;*

[2] *Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;*

**Abstract**

**Objective** All-solid-state single-frequency continuous-wave tunable Ti:sapphire lasers are highly valuable in scientific research and applications such as precision measurement, high-resolution spectroscopy, and cold atom physics due to the broad fluorescence spectrum of Ti:sapphire crystals, this type of laser requires separate control of the intracavity birefringent filter, etalon, and the piezoelectric ceramics mounted on the cavity mirrors during operation. The operation is cumbersome and complex. Limited by foreign technological blockades and system adaptability, the control systems of foreign Ti:sapphire lasers cannot be directly applied to our self-developed lasers. Therefore, the research objective of this paper is to independently develop a fully automatic tunable single-frequency continuous-wave Ti:sapphire laser, effectively improving the overall performance of the Ti:sapphire laser.

**Methods** A high-power all-solid-state single-frequency 532 nm laser is used as the pump source. The output laser is focused at the center of the Ti:sapphire crystal by two lenses. A half-wave plate (HWP) is employed to adjust the polarization direction of the pump laser for maximizing pump absorption efficiency. The resonator adopts a four-mirror figure-eight ring cavity structure. An optical diode (OD) is inserted into the laser resonator to make the intracavity oscillating laser operate in a unidirectional traveling-wave mode. Meanwhile, a birefringent filter (BRF) and an etalon are positioned to achieve stable single-frequency operation of the Ti:sapphire laser. The laser's output wavelength can be coarsely tuned over a broad range by adjusting the angle between the BRF's optical axis and the polarization direction of the intracavity oscillating laser, and then finely tuned over a narrow range by adjusting the etalon's incident angle. The cavity mirrors of the resonator are mounted on piezoelectric ceramics (PZT), which is composed of a long-range piezoelectric ceramic $PZT_1$ and a short-range piezoelectric ceramic $PZT_2$. $PZT_1$ is used for large-range adjustment of the laser resonator cavity length, while $PZT_2$ is for fine adjustment of the cavity length. After the oscillation mode of the laser resonator is locked with the transmission peak of the etalon, continuous mode-hop-free tuning of the laser output wavelength can be realized by controlling the piezoelectric ceramics, thereby accurately controlling the laser wavelength. On this basis, an automatic control system based on FPGA+LabVIEW is designed for the precise control of the laser wavelength, and the specific control method is as follows:The output wavelength of the laser is real-time acquired by a high-precision wavemeter, and the intracavity components are controlled based on this wavelength value. Firstly, coarse tuning of the laser wavelength is realized by adjusting the BRF. The BRF is installed in a rotary motor, which is controlled by a supporting control board. The control board is connected to a computer via serial communication. The program sends control signals to drive the rotary motor, which can change the angle of the BRF along the axial direction to achieve broad tuning of the laser.Then, fine tuning of the laser wavelength and locking of the etalon are achieved by adjusting the angle of the etalon in the resonator. The etalon is installed on a galvanometer motor, and the angle control of the etalon is realized by loading corresponding control signals onto the control board of the galvanometer motor. The locking control system of the etalon is mainly implemented in the FPGA.When the etalon is locked, to accurately tune the

laser output wavelength to a specific value, a voltage needs to be applied to the piezoelectric ceramics for continuous tuning. A triangular wave with adjustable amplitude and frequency as well as a DC signal with adjustable amplitude are output by the FPGA, DAC, and high-voltage amplifier as scanning signals to drive $PZT_1$, continuously scanning the cavity length of the laser resonator to realize continuous tuning of the output wavelength. After the wavelength is accurately tuned to the target wavelength, the deviation between the real-time output wavelength of the laser and the target wavelength is used as the error signal, which is generated into a control signal by the PID module to control the short-range piezoelectric ceramic $PZT_2$, realizing stable control of the laser wavelength.

**Results and Discussions** By automatically and synchronously controlling the BRF, Etalon, and PZT within the laser, precise one-button control of the laser output wavelength is achieved (Fig. 3-Fig. 5). Based on the above automatic control system (Fig. 2), a fully automatic tunable single-frequency continuous-wave Ti : sapphire laser (Fig. 1) has been realized. Without human intervention, the laser's output wavelength is automatically tuned to the target wavelength, with a tuning accuracy of up to 0.0001 nm (Fig. 7). This significantly enhances the operational convenience and reliability of the Ti : sapphire laser (Fig. 6).

**Conclusion** This paper presents a novel FPGA-based fully automatic tunable single-frequency continuous-wave Ti:sapphire laser system. Firstly,fully digital integrated development of the etalon locking system in a Ti:sapphire laser has been realized based on LabVIEW and FPGA. Advanced digital filtering techniques were employed to eliminate the influence of the extra pump noise, enabling automatic and stable locking of the etalon at any wavelength within the laser’s tuning range. Furthermore, automated control systems for the birefringent filter (BRF) and piezoelectric transducer (PZT) were designed. Through coordinated control of the BRF, etalon, and PZT, automatic and precise wavelength tuning of the Ti:sapphire laser was achieved.Based on the above automatic control system, the fully automated tunable single-frequency continuous-wave Ti:sapphire laser was realized with the output power of 5.6 W@795 nm, tuning range of 263 nm (692 nm-955 nm), continuous tuning range exceeding 30 GHz and the automatic wavelength control within whole tuning range.

**Keywords** laser; Ti:sapphire laser; single-frequency continuous-wave laser; FPGA; LabVIEW; full-automatic control