

面向超短脉冲激光器泵浦源的驱动系统设计及应用

高德辛 吕昶见 吕东明 于旺 秦伟平

Design and application of driving system for pump source of ultrashort pulsed laser

Gao Dexin, Lv Changjian, Lv Dongming, Yu Wang, Qin Weiping

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20210153

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计

Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor laser 红外与激光工程. 2018, 47(10): 1005003 https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1005003

高精度激光器电流驱动与交流温控系统设计

Design of current drive and alternating current temperature control system for high-precision laser 红外与激光工程. 2019, 48(9): 905004 https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0905004

双SESAM被动锁模超短脉冲光纤激光器

Double SESAM passively mode-locked ultrashort pulse fiber laser 红外与激光工程. 2018, 47(5): 505002 https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0505002

半导体激光器驱动电路设计及环路噪声抑制分析

Design of semiconductor laser driver circuit and analysis of loop noise – suppression 红外与激光工程. 2020, 49(6): 20190386 https://doi.org/10.3788/IRLA20190386

大电流窄脉冲激光器驱动芯片设计

Design of high current narrow pulse laser driving chip 红外与激光工程. 2021, 50(11): 20210034 https://doi.org/10.3788/IRLA20210034

915 nm半导体激光器新型腔面钝化工艺

915 nm semiconductor laser new type facet passivation technology 红外与激光工程. 2019, 48(1): 105002 https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0105002

面向超短脉冲激光器泵浦源的驱动系统设计及应用

高德辛,吕昶见,吕东明,于 旺,秦伟平

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子国家重点实验室, 吉林 长春 130012)

Design and application of driving system for pump source of ultrashort pulsed laser

Gao Dexin, Lv Changjian, Lv Dongming, Yu Wang, Qin Weiping

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: A driving system for the pump source of the ultrashort pulse laser was developed, which could provide high precision, high stability and high flexibility of constant-temperature control and constant-current drive for the five semiconductor lasers simultaneously. In order to improve the flexibility and integration of the driving system, the hardware part adopted the modular design scheme that the host computer, control board, driving board and power supply module were separated. The driving system program was developed based on embedded real-time operating system μ C/OS-III, which improved the real-time performance and expansibility of the system program. In the output correction part of the system, incremental PID algorithm optimized by genetic algorithm was adopted, the overshoot and the time to establish dynamic equilibrium of the system were reduced. The driving system had complete protection measures, such as soft-start and soft-shutdown, driving loop monitoring, overtemperature protection and other functions, to ensure the stable operation of the pump source. In

收稿日期:2021-03-09; 修订日期:2021-04-13

吉林省重点科技研发项目 (20180201120GX)

基金项目:国家自然科学基金 (11774132,61875071); 吉林省重大科技招标专项 (20170203012GX);

作者简介:高德辛,男,硕士生,主要从事先进光子学器件与设备方面的研究。

导师简介:秦伟平,男,教授,博士生导师,博士,主要从事稀土发光学与激光器方面的研究。

practical application, the temperature stability of the semiconductor laser is better than 0.035%, and the output current stability of the driving system is better than 0.001%. The developed driving system is integrated into a 1.5 μ m femtosecond fiber laser, the driving system drives five semiconductor lasers as the pump source, the emission spectrum, output pulse trains and single pulse profile of the seed laser and the laser amplifier are stable, The output power stability of the 1.5 μ m femtosecond fiber laser; constant-temperature control; constant-current drive;

fiber laser

0 引 言

超短脉冲激光具有时域脉宽极窄、频域光谱较宽 的特点,在光纤通信、光电传感、非线性光学、生物医 学、工业加工等领域有着广泛的应用[1]。半导体激光 器又称激光二极管 (Laser Diode, LD), 是固体激光器 和光纤激光器的主要泵浦源,其输出稳定性直接决定 了整机的输出性能^[2]。LD是以半导体材料作为工作 物质而产生激光的器件,工作时可通过注入电流的激 励方式,在半导体材料的能带(导带与价带)之间实现 非平衡载流子的粒子数反转,若处于粒子数反转 状态的大量电子与空穴复合,则会实现受激发射作 用^[3-5]。LD因具有结构紧凑、质量轻、能量转换效率 高、耗电省、便于波长调制等优点,被广泛应用于科 研、工业、商业、医疗、军事等领域^[6-8]。LD在用作光 纤激光器泵浦源时,具有易集成、效率高、热耗散小 等优越性,但其输出功率除了受到电源电流影响外, 还受外微分量子效率、阈值电流(两者大小均随温度 变化)的影响,同时,温度的变化也会引起 LD 的输出 波长漂移,导致 LD 输出功率与能量比不稳定。研究 人员当下大都采用多片半导体制冷器 (Thermoelectric Cooler, TEC) 做温控集成到驱动电源中或外加光学设 备稳定 LD 波长两种方式来减小温度带来的影响。 但方式一降低了小型化和功耗低的优势,方式二中外 加的辅助设备本身也存在温度漂移问题^[9]。为充分发 挥 LD 的应用优势, 有必要为其设计高精度、高稳定 度、高灵活性和易集成的驱动系统。

如今,在商用驱动电源方面,国内厂商主要有深 圳市南方联合实业、泰德激光科技、湖北光通科技、 武汉新特光电、上海技驰电子科技、北京特一安电源 科技、镭志威光电等公司。其中上海技驰电子科技公 司的产品性能最好,以 J-CW6010 型产品为例,其短期 稳定度为 1×10⁻³。国外研制半导体激光器的驱动电 源的公司较多且技术更为成熟,如 Wavelength、Vicor、 ILXlight、Alpha-las、TOELLNER 等,其产品的性能指 标也普遍优于国内的产品。其中, Wavelength 公司的 MPL2500型产品可输出 0~2.5 A的可调电流, 短期 (1 h)稳定度可达 3×10⁻⁵,长期 (24 h)稳定度可达 7.5×10^{-5[10]}。温控系统方面,美国 Arroyo Instrument 公 司生产的 5300 系列产品, 在 28~960 W范围内可实现 0.004 ℃的稳定性; 美国 Thorlabs公司研制的 TED200C型激光器恒温控制系统,输出电流为±2A, 温度控制精度可达 0.01 ℃, 稳定性可达 0.002 ℃。国 内北京特一安电源科技有限公司生产的 TWK-05V06A型产品,驱动电流为6A,输出功率范围为 10~30 W, 温控精度为±0.1 ℃。吉林大学闫万红等人 基于嵌入式系统和积分限幅式的 PID 控制算法研制 的温控仪器,温度控制稳定性达到了 0.0048 ℃[11]。但 是,这些产品均未实现多通道的高精度电流驱动和温 度控制,且存在体积大、灵活性差、不易集成等缺 点。结合国内外商用产品现状及未来发展需求[12-13], 文中设计了一种用于超短脉冲激光器泵浦源的驱动 系统,采用全数字化的系统架构,力求实现对 LD 的 高精度、高稳定度及灵活驱动。

1 驱动系统硬件设计

驱动系统总体框图如图 1 所示,采用交互、控制、驱动、供电分开的模块化设计,隔离了发热源以方便系统的热设计^[14]。控制板如图 2(a) 所示,尺寸为 10 cm×9 cm,可控制五路驱动板,主要负责电流、温度的设置,数据的处理、显示及存储,485 通讯,串口通讯等功能;驱动板如图 2(b) 所示,尺寸为 8 cm×6 cm,可便捷地集成到光纤激光器中,主要负责输出驱动电流和对 LD 的温度控制,可选择与控制板的连接数量,并可选择并联以提高驱动电流值;人机交互模块为工控屏 (富昌维控电子科技,型号 LEVI700ML),其

红外与激光工程

www.irla.cn





图 1 系统框图

Fig.1 Block diagram of the system



图 2 控制板和驱动板实物图

Fig.2 Photos of control board and driving board

带有的 485 接口可实现多设备 (控制板) 组网, 以控制 更多通道的驱动板, 并有设置电流、温度, 显示实时电 流、温度、报警信息等功能; AC-DC 电源转换模块为 驱动系统提供电源。

相较于目前的商用电源,文中设计的驱动系统硬 件采用全数字化芯片架构,具有精度高、体积小、易 集成的优点,且模块化的设计方案降低了硬件间的耦 合度,大大提高了驱动的灵活性。

1.1 控制板设计

控制板主要实现对驱动板的控制以及与上位机的通信等功能,如图1所示。其中主控模块为ARM (STMicroelectronics,型号 STM32)和 FPGA (Intel,型号 EP4CE10F17C8)的双核架构, FPGA负责驱动24

位高精度模数转换器 ADS1256 (Texas Instruments, 型 号 ADS1256) 采集实时数据并通过串口发送给 ARM 进行处理, 采样精度可达 0.6 µV。与单主控设计相 比, 双核架构降低了单主控引脚数量和算力不足的限 制, 可灵活增加数模、模数芯片的数量以实现多通道 控制。拨码开关负责设置下位机地址以支持 485 接 口下的多设备组网; LCD 负责显示电流、温度以及激 光二极管工作状态等信息; 使用 16 位高精度数模转 换器 DAC8501 (Texas Instruments, 型号 DAC8501) 输 出电流与温度的选点电压, 步进精度可达 38.15 µV; FLASH 负责存储电流、温度等历史数据。在各模块 的供电引脚和地之间并联接入钽电容以及陶瓷电容, 以此降低电源纹波的影响。在驱动系统的模拟地与 数字地上串联接入 0 欧姆电阻, 以确保 ADC 采样和 DAC 输出的精确性。

1.2 激光器驱动电路设计

驱动系统采用恒流激光驱动器 ATLS2A201D (鞍 山核心电子,型号 ATLS2A201D)为 LD 提供驱动电 流,可输出 0~2 A 连续可调电流,其噪声峰-峰值为 3.97 µA,稳定性可达 100 ppm/℃ (1 ppm=10⁻⁶),带有当 前电流和驱动回路状态指示、软起动和关闭以及过温 保护等功能,并具有效率高、无电磁干扰和体积小的 优势。ARM 利用当前电流与设置值进行 PID 算法计 算的结果,控制数模转换器输出选点电压控制 ATLS2A201D工作,其工作的温度范围为-40~85 ℃。 考虑到连续输出大电流的工作要求,预装了散热处 理,避免影响工作性能。

1.3 半导体制冷器驱动电路设计

针对如今 LD 大多内置 TEC 的情况, 文中选择高 效 TEC 控制器 TEC5V4A-D (鞍山核心电子, 型号 TEC-5V4A-D) 为其驱动, 其温度控制范围为 15~35 ℃, 稳 定性可达 0.01 ℃, 带有当前温度和温度控制环路状态 指示、软起动和关闭以及过温保护等功能, 且具有体 积小、无电磁干扰等优势。ARM 采集当前的温度值 与设定值进行 PID 算法校正, 控制数模转换器输出选 点电压控制 TEC5V4A-D, TEC5V4A-D 可工作在-40~85 ℃ 温度范围^[11]。

2 驱动系统软件设计

基于嵌入式实时操作系统 (Operating System, OS)

μC/OS-III 开发了主控 ARM 驱动层的程序。相较于 传统的轮询系统和前后台系统,该设计具有更加优异 的实时性和扩展性。驱动层程序主要完成如下操作: 激光驱动器和 TEC 驱动器输出的激活与关闭,电流 和温度的设置、输出与校正,LD 状态检测及报警,输 出限幅检测,零点飘移校正,硬件自检,485 (MODBUS-RTU 协议)通讯,串口通讯,LCD 显示,FLASH 读写, CPU 和内存占用率监测等;FPGA 作为协处理器,程 序采用 Verilog 语言编写,驱动模数转换器采集当前 数据,通过串口发送给 ARM 处理。

2.1 遗传算法优化的增量式 PID 控制器

遗传算法衍生自达尔文进化论中的"物竞天择, 适者生存"法则,通过模拟遗传学机制和自然选择的 过程寻找全局最优解,具有自适应性和群体搜索能 力,并有避免需要优化参数在搜索期间因为落入局部 某个单峰的极值点而将之作为最优解的优势^[15-17]。 图 3(a) 为基本遗传算法最优解求解过程。

传统 PID 控制起源于 20 世纪初, 通过对设定值 和实际值的偏差进行比例、积分、微分线性组合运 算, 输出反馈结果到被控对象使其达到动态平衡^[18]。 PID 控制具有简洁、鲁棒性好、易实现等优点, 对于大 致呈线性、动态特性不随时间变化的系统具有优良的 控制效果^[19]。图 3(b) 为传统 PID 控制系统工作原理 图, 其位置式离散数学模型为:

$$OUT = (K_p \times E_k) + \left(K_i \times \sum_{k=0}^n E_k\right) + [K_d \times (E_k - E_{k-1})]$$
(1)

式中: K_p、K_i、K_d分别为比例、积分、微分系数; E_k、 E_{k-1}为本次和上次偏差; OUT为输出结果。但在嵌入 式系统中应用时,该模型存在计算量大、占用内存多 的缺点。为此,采用增量式 PID 算法,记上次的输出 控制信号值为OUT_{k-1},当前输出值为OUT_k,两者相减 得到增量式 PID 输出ΔOUT的数学模型:

 $\Delta OUT = OUT_{k} - OUT_{k-1} = K_{p} \times (E_{k} - E_{k-1}) + K_{i} \times E_{k} + K_{d} \times (E_{k} - 2E_{k-1} + E_{k-2})$ (2)

式中: *E*_{k-2}为上上次偏差。增量式 PID 算法中没有对 历史偏差的累加, 极大地弥补上述不足之处。但无论 位置式还是增量式 PID 算法, 对*K*_p、*K*_i、*K*_d三个变量 的整定是控制系统的关键, 整定方式一般选取经验数 值或者试凑数值, 由于三个参数并非独立存在, 经验





图 3 校正算法框图

Fig.3 Block diagram of correction algorithm

法或试凑法往往需要耗费大量人力及时间,且在被控 对象为参数时变或非线性时传统 PID 控制器经常存 在控制效果不稳定的情况^[20]。

针对上述问题,文中结合遗传算法实现智能 PID 控制算法,更精准地进行电流和温度的校正。首先, 参照 PID 参数整定的经验值,将比例、积分、微分三 个参数的取值区间确定为: $K_p \in [0,1], K_i \in [0,0.1], K_d \in$ [0,5],依据参数区间初始化种群,并根据处理器性能 将种群数量设置为合适值。评价 PID 算法控制效果 的主要性能指标为超调量 σ 、上升时间 t_r 及其稳态误 差函数,为平衡系统的动态和稳态性能指标,设定适 应度函数如下:

$$J = (1 - \phi) \times \sigma + \phi \times t_r + \int_0^\infty t |e(t)| dt$$
(3)

式中: ¢为加权值, 取值区间为(0,1); 遗传函数J的值 越小代表个体适应能力越强。将个体适应度从大到 小依次排序, 淘汰概率设置为50%, 未被淘汰的个体 进行概率为α的随机交叉, 由个体 p、q 产生新个体 y 的算法为:

$$\begin{bmatrix} K_{py} \\ K_{iy} \\ K_{dy} \end{bmatrix} = (1 - \alpha) \times \begin{bmatrix} K_{pp} \\ K_{ip} \\ K_{dp} \end{bmatrix} + \alpha \times \begin{bmatrix} K_{pq} \\ K_{iq} \\ K_{dq} \end{bmatrix}$$
(4)

为防止参数整定过程在早期就因陷入局部最优 解而终止,设置变异概率为β,对个体y有:

$$\begin{bmatrix} K_{py} \\ K'_{iy} \\ K'_{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{py} \\ K_{iy} \\ K_{dy} \end{bmatrix} + (1 - \beta) \times \begin{bmatrix} K_{py} \\ K_{iy} \\ K_{dy} \end{bmatrix}$$
(5)

完成选择交叉变异操作之后,再次计算个体的适 应度。当进化的次数达到最大迭代次数或整定参数 满足条件,整定寻优过程停止,否则继续进行选择交 叉变异操作,直至得到全局最优参数*K_p、K_i、K_d并存* 储,下次开机可直接调用,以节约前期迭代的时间。 图 3(c)为遗传算法优化的增量式 PID 控制系统结 构图。

3 驱动系统性能测试

为验证研制的驱动系统性能,选取两个额定功率 500 mW、中心波长 980 nm 的 LD (Oclaro,型号 LC96-A74P) 和三个额定功率 650 mW、中心波长 1480 nm

的 LD (Anritsu, 型号 AF4B), 分别编号 LD1~LD5。在 室温环境下,将 LD1 电流设置为 80 mA, LD2 电流设 置为 200 mA, LD3~LD5 电流均设置为 1200 mA, 所 有 LD 温度均设定为 25 ℃。使用六位半数字万用表 (Agilent Technologies, 型号 34410A) 测试五路 LD 的 电流值,同时记录温度数据,每 5 min 一次,持续记录 300 min, 测试结果如图 4 所示。

根据稳定度计算公式[21]:

stability value =
$$\frac{\text{standard deviation}}{\text{average value}} \times 100\%$$
 (6)

将测得数据代入公式(6), 五路LD的输入电流 稳定度分别为0.001%, 0.0009%, 0.0005%, 0.0005%, 0.0006%, 温度稳定度分别为0.032%, 0.031%, 0.034%, 0.033%, 0.035%。



图 4 五路 LD 电流、温度-时间关系曲线

Fig.4 Current, temperature-time relation curve of five-channel LD

4 1.5 μm 飞秒光纤激光器测试

驱动系统是激光泵浦源的核心,为验证驱动系统 稳定性,将文中设计的驱动系统集成到中心波长为 1.5 μm 的飞秒光纤激光器中驱动五路 LD 作为泵浦 源,实验装置示意图如图 5 所示。

泵浦源采用波长为 980 nm 和 1480 nm 的 LD, 自 左至右依次为 LD1~LD5, 其中 LD1 和 LD2 波长为 980 nm, LD3~LD5 波长为 1480 nm。经由波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM) 将泵浦光与信号光耦合进 入谐振腔内, 掺铒增益光纤 (Erbium-Doped Fiber, EDF) 作为激光器中的工作物质, 通过吸收泵浦光的能量, 在谐振腔内产生 1.5 μm 波段的种子激光。腔内加入 光隔离器 (Isolator, ISO) 确保激光的运转方向, 规避产 生空间烧孔效应。加入碳纳米管可饱和吸收体器件 (Carbon Nanotube Saturable Absorber, CNT SA) 在激光 腔内对入射激光起到调制作用, 脉冲激光通过一个分 束比为 10:90 的输出耦合器 (Output Coupler, OC) 将 10% 的激光输出进入后级激光放大器, 90% 的激光反 馈回腔内用于铒离子的受激辐射。种子源激光器输 出的脉冲激光进入一级掺铒光纤放大器进行放大, 由 中心波长为 980 nm 的 LD 泵浦, 一级放大器输出的脉 冲激光进入二级掺铒光纤放大器进行放大。二级放 大器由三个中心波长为 1480 nm 的 LD 泵浦。在一、







Fig.5 Experimental setup of the 1.5 µm femtosecond fiber laser

二级放大器之间接入色散补偿光纤 (Dispersion Compensation Fiber, DCF),以防止脉冲激光峰值功率增加太快而损坏仪器,或者过早出现非线性效应而影响对脉冲激光的功率放大。使用光谱仪 (YOKO-GAWA,型号 AQ6375)、数字示波器 (Tektronix,型号 DPO70604C)、自相关仪 (Aveata,型号 AA-10DD)、频谱仪 (Agilent,型号 E4411B) 和光功率计 (Thorlabs,型号 PM100D)测试激光器输出的光信号^[22-24]。

在 1.5 µm 光纤激光器中,种子泵浦源的工作温 度设置为 25 ℃, 提高 LD1 驱动电流至 60 mA, 激光 器输出连续激光,继续提高LD1驱动电流至 65 mA, 激光器实现自启动锁模脉冲激光输出。测得 种子源输出光谱如图 6(a) 所示,其3 dB 带宽为 2.2 nm, 种子源输出的激光脉冲序列如图 6(b) 所示,可以看 出种子激光器具有稳定的脉冲输出,其相邻脉冲时 间间隔为 23.2 ns, 对应重复频率为 43.1 MHz。种子 源输出的激光单脉冲如图 6(c) 所示, 脉冲宽度为 100 fs。保持激光器持续工作,测得其射频谱如图 6(d) 所 示,其基频位于 43.47 MHz 处, 信噪比为 50 dB, 其中 插图为大扫描范围(1000 MHz)下的输出激光射频谱 图,可以看到锁模激光有稳定的脉冲输出。在测试 长期稳定性时,每间隔 36 min 进行一次光谱采样,持 续3h,如图6(e)所示。测试结果表明,锁模激光输 出始终保持稳定,说明驱动系统工作稳定性良好。

设置一级放大器的泵浦源 LD2 驱动电流为 200 mA, 二级放大器泵浦源 LD3~LD5 电流均为

1200 mA, LD2~LD5 工作温度均设置为 25 ℃, 测得一级放大器的输出光谱如图 7(a) 所示, 其 3 dB 带宽为 3.1 nm; 二级放大器的输出光谱如图 7(a) 所示, 在对超短脉冲激光进行放大时, 信号光经一级掺铒光纤放大器后进入一段色散补偿光纤, 由于自相位调制效应导致光谱变宽, 但其中心波长依旧为 1.5 μm。二级放大器的输出激光的脉冲序列如图 7(b) 所示, 可以看出其输出脉冲稳定, 间隔为 22.9 ns, 对应重复频率为 43.67 MHz, 其输出单脉冲如图 7(c) 所示, 由于脉冲激光峰值功率的增加, 其宽度被压缩为 98.0 fs。监测泵 浦源的注入电流与 1.5 μm 光纤激光器的输出光功率, 得到其 *I-P* 关系如图 7(d) 所示。根据相关系数 *R* 的 计算公式:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N} (X_{i} - \overline{X})^{2} (Y_{i} - \overline{Y})^{2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_{i} - \overline{X})^{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (Y_{i} - \overline{Y})^{2}}}$$
(7)

式中: (*X_i*, *Y_i*)代表驱动电流与光功率的第*i*个数据点; *X*和*Y*为数据的平均值。当*N*=12时,得到*R*=0.997。 由此可知,在该实验的注入电流与输出光功率范围内 两者成线性关系^[25],说明驱动系统温控效果良好。每 隔 5 min 记录一次激光器的输出功率,持续 300 min, 测试结果如图 7(e) 所示。根据公式 (6) 计算得到功率 稳定度为 0.16%,说明驱动系统输出电流和泵浦源工 作温度稳定度均良好。



图 7 1.5 µm 飞秒光纤激光器测试数据

Fig.7 1.5 μ m femtosecond fiber laser test data

5 结 论

以面向超短脉冲激光器泵浦源的驱动及温度控 制为出发点,研制了一种基于嵌入式系统和遗传算法 优化的增量式 PID 算法的多通道驱动系统,实现了对 LD 的恒温控制、恒流驱动以及输出保护等基本功 能。所研制的系统还具有精度高、稳定度高、集成度 高及灵活性高等优势。在实际测试中,输出电流稳定 度优于 0.001%, LD 温度稳定度优于 0.035%, 普遍高 于国内现有的 LD 稳定性 (0.1%~1%) 指标^[26],能够满 足使用需求;将其应用于 1.5 μm 飞秒光纤激光器中驱 动五路 LD 作为泵浦源,测试种子激光器和激光放大 器,输出激光的中心波长稳定,脉冲序列以及单脉冲 稳定,激光器输出功率稳定度为 0.16%,证实了该驱 动系统的性能,在激光器泵浦源驱动系统领域具有良 好的应用前景。

参考文献:

- Ren Jun, Wu Sida, Cheng Zhaochen, et al. Mode-locked femtosecond erbium-doped fiber laser based on graphene oxide versus semiconductor satura absorber mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0602013. (in Chinese)
- [2] Ma Xiaoyu, Zhang Naling, Zhong Li, et al. Research progress of high power semiconductor laser pump source [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 120-129. (in Chinese)
- [3] Yang D C, Chu S L, Wang Y F, et al. Frequency upconverted amplified spontaneous emission and lasing from inorganic perovskite under simultaneous six-photon absorption [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2066.
- [4] Li Jinyou, Wang Hailong, Yang Jin, et al. Voltage-temperature characteristics of InGaAs/GaAs/InGaP quantum well laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(8): 971-976. (in Chinese)
- [5] Zhang Peng. Analysis and study of the physical characteristics of a semiconductor laser [J]. *Laser Journal*, 2018, 39(12): 106-110. (in Chinese)
- [6] Pongrac B, Onlagic D, Njegovec M, et al. THz signal generator using a single DFB laser diode and the unbalanced optical fiber interferometer [J]. *Sensors*, 2020, 20(17): 4862.
- [7] Dong Ningning, Cui Jinjiang, Xu Jiangen, et al. Design of control system for 1470-nm high-power semiconductor laser lipolysis device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1896-1903. (in Chinese)

- [8] Lin Xingchen, Zhang Yawei, Zhu Hongbo, et al. 10 kW CW diode laser cladding source and thermal effect [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 820-825. (in Chinese)
- [9] Liu Xu, Wei Jingsong, Tan Chaoyong, et al. Theoretical analysis of multi-wavelength temperature-free-control pump source of laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0505004. (in Chinese)
- [10] Cong Menglong, Li Li, Cui Yangsong, et al. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1629-1635. (in Chinese)
- [11] Yan Wanhong, Zhou Yanwen, Yu Di, et al. Temperature control system of semiconductor device and application for infrared gas detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 0312002. (in Chinese)
- [12] Research Group of Strategic Research on China's Laser Technology and Its Application by 2035. Strategic research on China's laser technology and its application by 2035[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(3): 1-6. (in Chinese)
- [13] Li Xudong, Mei Feng, Yan Renpeng, et al. Review of burstmode lasers for high-speed PLIF imaging diagnostics [J]. *Optics* and *Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2116-2126. (in Chinese)
- [14] Quan Wei, Li Guanghui, Chen Xi, et al. Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system [J].
 Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 1080-1086. (in Chinese)
- [15] Wei Xiaochao, Ni Xiangdong, ZhaoXin, et al. Feedforward-feedback and PID control of hydraulic speed regulation system based on genetic algorithm [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2020(11): 21-26. (in Chinese)
- [16] Cuéllar M P, Gómez-Torrecillas J, Lobillo F J, et al. Genetic algorithms with permutation-based representation for computing the distance of linear codes [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, 60(6): 100797.
- [17] Ramos-Figueroa O, Quiroz-Castellanos M, Mezura-Montes E, et al. Variation operators for grouping genetic algorithms: A review [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, 60(6): 100796.
- [18] Hosseini S A, Shirani A S, Lotfi M, et al. Design and application of supervisory control based on neural network PID controllers for pressurizer system [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2020, 130: 103570.
- [19] Zhou Jinglong, Chen Jun, Song Laijian. PID control method of calender temperature control system optimized by genetic

algorithm [J]. *Plastics Science and Technology*, 2020, 48(10): 115-118. (in Chinese)

- [20] Meng Zhuo. Research on temperature control of cement rotary kiln based on neural network PID[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [21] Dai Yuanyuan, Song Limin, Zhong Haiwen, et al. Design of control system of portable dual-wavelength laser therapeutic instrument [J]. *Laser Journal*, 2020, 41(11): 144-148. (in Chinese)
- [22] Kang Zhe. Study on mode-locked fiber lasers based on gold nanorods saturable absorbers and their applications[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)

- [23] Li Nan. Study on widely tunable ultrashort pulse fiber laser around 2 μm and its application[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [24] Liu Jiaxing. Femtosecond fiber lasers based on gold nanorods/Dshaped fiber saturable absorber[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [25] Tian Xiaojian, Shang Zuguo, Gao Bo, et al. Control system for 980 nm high stability laser pump source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 982-987. (in Chinese)
- [26] Zhou Zhen, Qi Zhongliang, Qin Yong. Design of driving method for low power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 31(10): 135-139. (in Chinese)