

应用于光纤激光系统的高增益高稳定性光纤放大器研究

黎志刚,谢卓鑫,李晓晖*,张良,陈峰,杨万里,杨小亮

(中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林 541004)

摘要:针对高功率光纤激光系统对增益与稳定性的双重需求,设计了一种高增益高稳定性光纤放大器。该放大器采用单纤双程双级放大技术的光路设计,结合全保偏光纤结构,提升增益介质利用率,同时开发了基于自动功率控制与闭环反馈的电路系统,通过峰值采样电路和精密泵浦驱动电路实现动态调节。实验结果表明:系统最大增益达 28.25 dB,闭环控制使输出能量波动从 2.21%降至 0.42%,稳定性提升了 81%;减少泵浦激光器用量,在 260 mA 泵浦电流时实现 70.2 nJ 脉冲能量输出。

关键词:光纤激光系统;高增益;能量稳定性;光纤放大器;闭环反馈控制

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)03-0102-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.03.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on high-gain and high-stability fiber amplifiers for fiber laser system

LI Zhigang, XIE Zhuoxin, LI Xiaohui*, ZHANG Liang, CHEN Feng, YANG Wanli, YANG Xiaoliang

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To address the dual requirements of gain and stability in high-power fiber laser system, a high-gain and high-stability fiber amplifier is designed. The optical path employs single-fiber double-pass dual-stage amplification technology combined with an all-polarization-maintaining fiber structure to improve gain medium utilization. Additionally, a circuit system based on automatic power control and closed-loop feedback is developed, achieving dynamic regulation through a peak sampling circuit and precision pump driving circuit. Experimental results show that the system achieves a maximum gain of 28.25 dB, with closed-loop control reducing output energy fluctuations from 2.21% to 0.42%, improving stability by 81%. Moreover, it reduces the required number of pump lasers while delivering a pulse energy output of 70.2 nJ at a pump current of 260 mA.

Key words: fiber laser system, high gain, energy stability, optical fiber amplifier, closed-loop feedback control

0 引言

掺铒光纤放大器(YDFA)以掺铒光纤(YDF)作为增益介质,兼具成本效益、全光纤结构及高抗损伤阈值等优势^[1],在激光雷达^[2-3]、激光测距与探测^[4-5]、光纤传感^[6]、激光精密加工^[7-8]、高能激光武器^[9-10]以及激光聚

变^[11-13]等领域具有重要应用价值。

在高功率光纤激光系统中,增益系数直接影响脉冲能量的上限。因此,提升增益系数有助于实现更高能量输出,满足特定应用场景需求^[14]。2012年,朱韧等人^[15]采用主振功率放大器(MOPA)结构,通过四级放大系统结合应变梯度与脉冲整形技术,抑制受激布里渊散射效应(SBS),最终获得 34.1 dB 的单脉冲增益。2018年,FU S J 等人^[16]利用 3 个泵浦激光器驱动掺铒磷酸盐光纤(纤芯直径为 25 μm ,长度为 34 cm),在 100 ns 脉宽条件下实现 470 μJ 单脉冲能量输出,增益达 34 dB。虽然上述方案通过增加泵浦源和放大级数获得了较高增益,但存在系统成本上升和集成度降低的问题。2019年,PATOKOSKI K 等人^[17]采用轴向

收稿日期:2025-03-31。

基金项目:广西科技基地和人才专项(桂科 AD24010060)资助。

作者简介:黎志刚(1985—),男,硕士研究生,高级工程师,主要从事光纤激光通信、脉冲激光产生与放大、光电信号探测与处理等领域的研究工作,主持了国家级及省部级重大科技专项 3 项。

* **通信作者:**李晓晖(1998—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为高能光纤激光系统及超快光纤激光器。



锥形掺铒光纤结构,在抑制 SBS 效应的同时,实现了基模脉冲能量输出 288 μJ ,双模输出时脉冲能量提升至 524 μJ 。该方案通过优化预放大与功率放大环节,显著提升了能量转换效率。2022 年,SHI C D 等人^[18]通过级联 50 μm 掺铒磷酸硅酸盐光纤与 35 μm 硅增益光纤,在控制反向 SBS 散射的同时获得 14 dB 增益输出。这类简化设计虽然降低了成本并提高了集成度,但增益系数的降低可能限制其应用范围。

YDFA 的性能优化不仅需要考虑增益系数,输出稳定性同样是关键指标,尤其在高能激光武器和惯性约束聚变等领域^[19-20]。理论研究方面,BAI X L 等人^[21]通过建模仿真揭示了额外反馈对热分布与波形演化的作用机制,为稳定性优化提供了理论依据;温伊洁等人^[22]系统分析了影响 YDFA 输出性能的关键因素,为后续设计优化奠定了理论基础。实验研究方面,FLORENT S 等人^[23]在美国国家点火装置(NIF)中采用 MOPA 结构 YDFA,实现了 10 kHz 重复频率下 100 μJ 脉冲输出,但未开展长期稳定性测试与控制电路设计;欧美聚变装置采用的 MOPA 结构 YDFA 虽能保持 20 dB 增益和 1.5% 能量波长稳定性(2 h)^[24-26],但仍有较大的提升空间。

上述研究表明,现有研究尚未系统解决增益系数、输出稳定性、系统集成度与制造成本之间的协同优化问题。基于此,本文设计一种高增益高稳定性光纤放大器,满足高功率光纤激光系统的应用需求。

1 高增益高稳定性光纤放大器设计

本文设计的光纤放大器采用了单纤双程双级放大技术,配套开发基于自动功率控制与闭环反馈的电路系统。

1.1 光路设计

本文设计的高增益高稳定性 YDFA 采用全保偏光纤及保偏光学器件构建,光路结构如图 1 所示。系统主要由 YDF、光环形器、滤波器、法拉第旋转镜(FRM)、波分复用器(WDM)、99:1 偏振分束器(PBS)及泵浦激光器等关键器件组成。

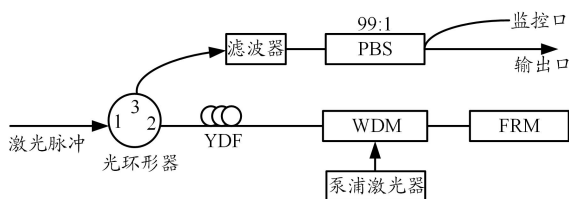


图 1 光路结构原理图

YDFA 的输入光信号为 1 kHz 重复频率的纳秒级激光脉冲,采用单纤双程双级放大技术,可充分利用增益介质的反转粒子数,从而显著提升增益系数。其工作过程如下:

1)初始信号注入:波长为 1 053 nm 的激光脉冲从光环形器的端口 1 输入,经端口 2 输出后进入 YDF,完成第一次放大。

2)泵浦耦合:980 nm 泵浦光通过 WDM 与信号光耦合,共同注入 YDF 后段,进一步增强增益。

3)反射与二次放大:放大后的激光脉冲由 FRM 反射,沿原路径返回并再次通过 YDF,实现第二次放大。

4)信号输出与滤波:二次放大后的信号从环形器的端口 3 输出,经频域滤波器滤除放大自发辐射(ASE)噪声。

5)分束与反馈控制:滤波后的信号通过 99:1 PBS 分束,其中 99% 的信号作为主激光输出,1% 的信号经监控口输出,被电中的光电探测器(PD)接收,为闭环反馈系统提供采样信号。

1.2 电路设计

整个光纤链路包含多个单元设备,这些设备的噪声累积将直接影响系统的输出稳定性。此外,由于光纤链路的较长光程,系统不可避免地受到光纤应力、环境温度变化以及偏振态退化等多种因素的影响,从而引起输出功率的波动。因此,在光纤链路中引入主动功率稳定控制十分必要。YDFA 作为系统中的有源组件,能够通过主动功率闭环反馈控制技术实现对系统输出功率稳定性的精确控制。YDFA 的电路设计框图如图 2 所示。其工作过程如下:

1)信号采集与反馈:PBS 的 1% 端作为反馈信号源,通过 PD 将主激光脉冲的光信号转换为电信号;电信

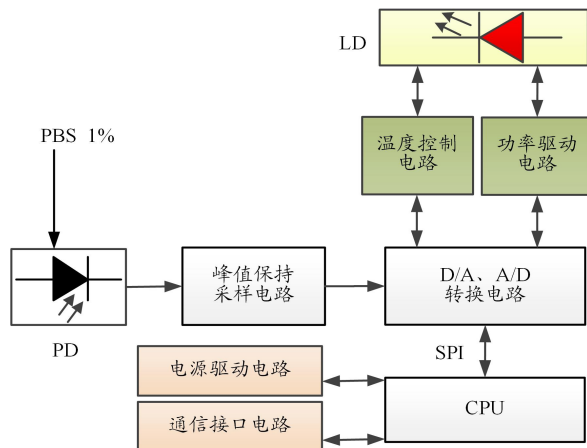


图 2 电路设计框图

黎志刚, 谢卓鑫, 李晓晖, 等: 应用于光纤激光系统的高增益高稳定性光纤放大器研究

号经过峰值保持采样电路处理后, 输入到数/模(D/A)、模/数(A/D)转换电路, 完成模拟信号与数字信号的相互转换。

2) 中央处理与控制: 中央处理器(CPU)通过串行通信协议(SPI)与D/A、A/D转换电路、电源驱动电路及通信接口电路进行数据交互, 实现集中控制; CPU根据反馈信号和预设参数, 通过D/A、A/D转换电路输出控制指令。

3) 驱动与执行: 温度控制电路和功率驱动电路接收CPU的指令, 分别对激光二极管(LD)的温度和功率进行精确调节; 电源驱动电路为整个系统提供稳定的电力支持。

4) 通信与协调: 通信接口电路负责系统与外部设备的数据交换, 确保指令和反馈信息的实时传输。

1.2.1 峰值保持采样电路

峰值保持采样电路通过自动闭环反馈控制电路实时监测脉冲能量变化, 并据此调节泵浦功率, 从而确保输出激光脉冲能量的稳定性, 其电路如图3所示。

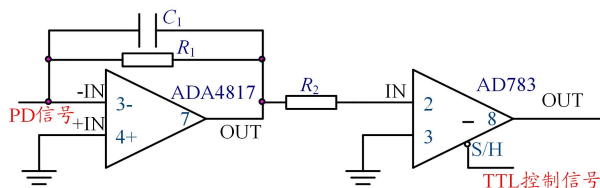


图3 峰值保持采样电路

图3中, 电路核心由低噪声超高速运算放大器ADA4817和高速采样保持放大器AD783构成。ADA4817负责将PD输出的脉冲电流信号转换为相应的电压信号; AD783在外部晶体管-晶体管逻辑(TTL)低电平触发时执行峰值保持操作, 在高电平触发时输出脉冲电压峰值。该峰值电压经A/D转换电路读取后, 即可准确反映反馈光信号的强度信息。

1.2.2 功率驱动电路

功率驱动电路的主要功能是为泵浦激光器提供所需的驱动功率, 电路结构如图4所示。功率驱动电路通过在激光器电流回路中串联高精度采样电阻 R_s , 形成闭环负反馈控制系统, 从而保证驱动电流的稳定

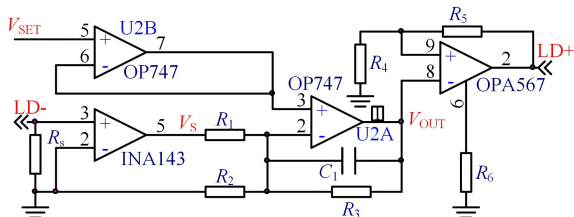


图4 泵浦激光器驱动电路

性。在此设计中, LD+和LD-分别连接至泵浦激光器的正负引脚。高速电压差分放大器INA143的输出 V_s 反映了流经泵浦激光器的实时电流大小。从精密运算放大器OP747(U2B)的引脚5设置一个代表泵浦激光器驱动电流预期值的电压 V_{SET} , 当电路达到稳定状态时, 放大器OP747(U2A)的输出 V_{OUT} 即为预期的 V_{SET} , 并且该电压值与采样电阻两端的电压 V_s 相等。由此可见, 该电路实现了对泵浦激光器驱动电流的精密控制。

1.3 光纤放大器自动功率控制与闭环反馈流程

光纤放大器自动功率闭环反馈流程如图5所示。具体过程如下:

系统首先进行初始化, 设置初始泵浦电流 I_k , 随后启动反馈控制。主激光脉冲信号经过PBS后, 1%的信号通过PD转化为电流信号。该电流信号经转换为电压后, 由峰值保持采样电路处理; CPU启动A/D转换器对保持的电压值连续采样10次, 并计算这些采样的平均值 D_k 作为反馈信号。

接下来, 将当前采样平均值 D_k 与前一次采样平均值 D_{k-1} 进行对比, 计算相对误差 ΔI_k 。系统判断该误差是否满足预设的稳定性目标; 若满足, 则保持当前泵浦电流 I_k 并结束调整; 若不满足, 则根据公式 $I_{k+1} = I_k \times (1 + \Delta I_k)$ 重新计算泵浦电流 I_{k+1} , 并更新泵浦电流设置。通过这种循环调节机制, 实时监控并调整泵浦电流, 使放大器输出功率的采样值与预期值之间的偏差保持在极小范围内, 从而实现放大器稳定输出的目标。

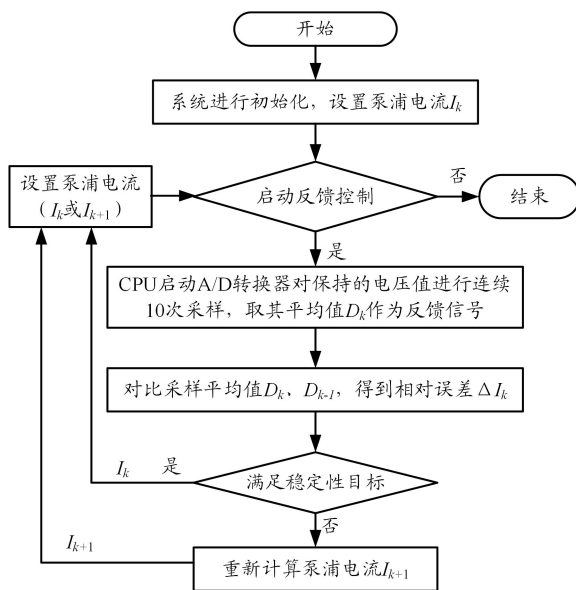


图5 自动功率控制与闭环反馈流程

2 实验结果与分析

为评估YDFA的性能指标, 本文搭建了如图6所

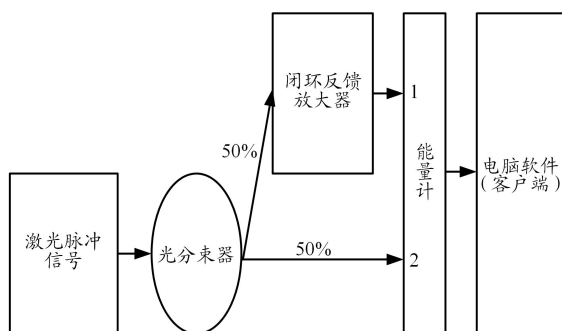


图6 闭环反馈光纤放大器测试平台

示的实验测试平台。测试系统采用 1 053 nm 中心波长、1 kHz 重复频率、5 ns 脉宽的激光脉冲作为输入源。当激光脉冲经过一个 50:50 的 PBS 后被分成 2 路：一路通过闭环反馈控制的光纤放大器处理后接入双通道能量计的端口 1；另一路则直接连接到同一能量计的端口 2。通过能量计配套的客户端软件，可以直接获取能量稳定性的波形数据。其中，能量计端口 2 记录的数据和波形被视为放大器输入信号的参考参数。

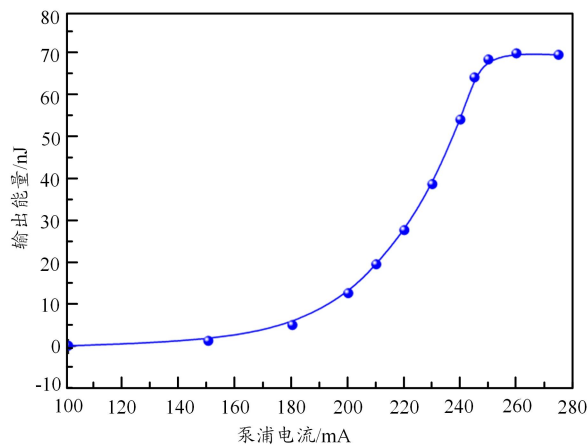
系统上电后，从能量计端口 2 读出的放大器输入脉冲信号能量 Q_{IN} 为 105 pJ。接着，初始化放大器以确保其正常工作，并将放大器泵浦电流的初始值设置为 100 mA。启动放大器的闭环反馈控制程序后，通过改变放大器泵浦电流的大小，记录从能量计端口 1 获得的输出能量读数 Q_{OUT} 。放大器增益 G 可通过式(1)计算得出，结果如表 1 所示。

$$G=10 \times \lg \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}} \quad (1)$$

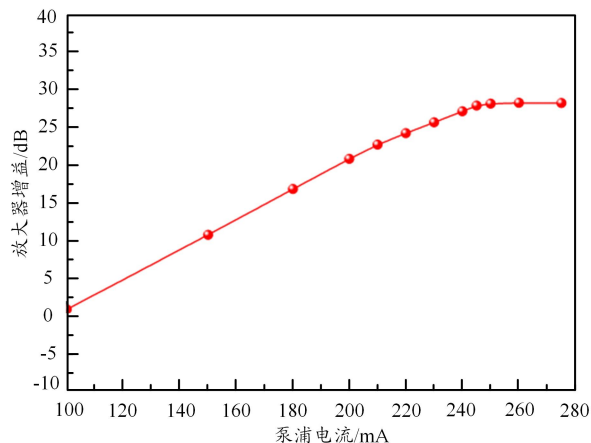
表 1 闭环反馈光纤放大器增益指标数据

泵浦电流/mA	输出能量/nJ	放大器增益/dB
100	0.13	0.93
150	1.26	10.78
180	5.09	16.86
200	12.72	20.83
210	19.63	22.72
220	27.81	24.23
230	38.82	25.68
240	54.32	27.14
245	64.43	27.88
250	68.75	28.16
260	70.20	28.25
275	69.86	28.23

以表 1 中的泵浦电流数据作为横坐标，分别以输出能量数据和放大器增益数据作为纵坐标，绘制出对应的曲线关系，如图 7 所示。



(a) 输出能量关系曲线



(b) 增益关系曲线

图7 泵浦电流与输出能量、增益的关系

从图 7(a)可以看出，当将放大器的泵浦电流设定为小于 150 mA 时，放大器输出的脉冲能量变化较小；而当泵浦电流大于 180 mA 时，放大器输出的脉冲能量呈指数形式增加。当泵浦电流超过 240 mA 后，输出脉冲能量的变化逐渐放缓，此时泵浦激光器的输出趋于饱和状态。在泵浦电流达到 260 mA 时，输出脉冲能量达到峰值(70.2 nJ)。这种现象证实了泵浦激光器输出功率与电流之间存在分段特性：当泵浦电流低于其阈值电流时，泵浦激光器的输出功率缓慢增长；当高于阈值电流时，输出功率则呈指数增长。

从图 7(b)可以看出，该放大器经测试得出的最大增益值为 28.25 dB，并且在放大器增益达到最大值之前，曲线均处于线性区域，这表明其性能稳定可靠。

图 8 为 YDFA 输出激光脉冲能量稳定性的对比实验结果。在初始实验阶段，未启用 YDFA 放大时，原

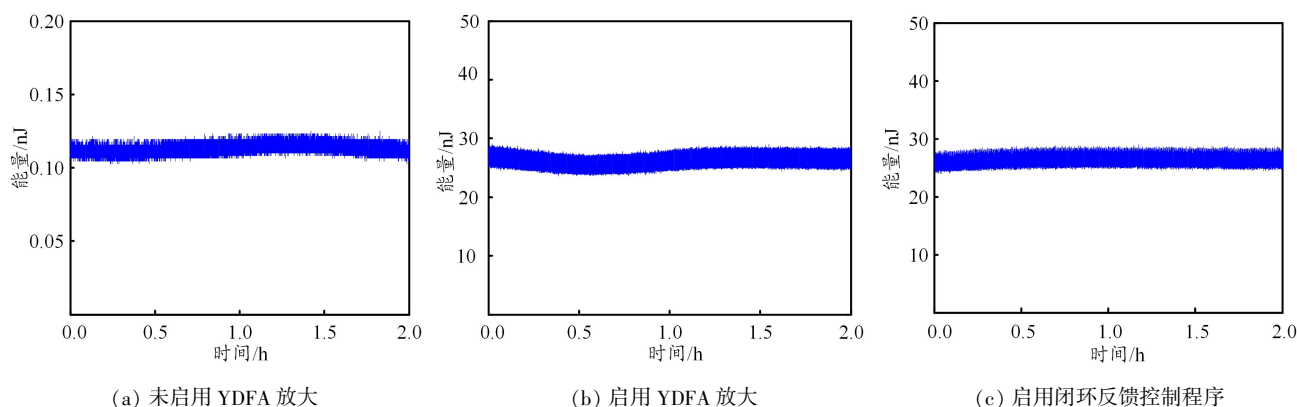


图 8 YDFA 输出激光脉冲能量稳定性对比图

始激光脉冲的能量稳定性特征如图 8(a)所示。可以看出,经过 2 h 的连续测量统计,单脉冲能量为 0.105 nJ,计算出能量波动率为 1.95%。

随后,将此原始脉冲注入 YDFA 进行能量放大,设置泵浦电流为 220 mA 且闭环反馈控制程序处于关闭状态,测得 YDFA 输出激光脉冲能量如图 8(b)所示。可以看出,经 2 h 的连续测量统计,输出脉冲能量稳定在 27.81 nJ (对应增益系数为 24.23 dB),计算出能量波动率升高至 2.21%。这表明,在未开启闭环反馈控制程序的情况下,YDFA 放大过程显著加剧了能量波动。

接着,启用了闭环反馈控制程序,并在相同条件下进行了 2 h 的连续测试,测得 YDFA 输出激光脉冲能量如图 8(c)所示。可以看出,输出脉冲能量分布显著改善,几乎稳定在 24.23 dB,计算出能量波动率降至 0.42%。

该对比实验数据清晰地证实了闭环反馈控制程序能够有效抑制放大过程中的能量波动,使得输出脉冲能量的稳定性提升了大约 81% (从 2.21% 降至 0.42%)。这一结果有效地验证了本文设计的闭环反馈控制程序在光纤放大系统中的重要作用。

3 结束语

本文针对高功率光纤激光系统的实际应用需求,在光路设计中采用了单纤双程双级放大技术。该技术不仅有效提升了 YDFA 的增益,还减少了泵浦激光器的数量与放大级数,同时提高了光路集成度并降低了成本。在电路控制方面,开发了一种基于自动功率控制与闭环反馈的系统,能够实现对放大器功率的精准控制。

实验结果表明,此光纤放大器的最大增益可达 28.25 dB。此外,闭环反馈控制程序能够有效地抑制放

大过程中的能量波动,使得输出脉冲能量在 2 h 内的稳定性提升了大约 81%。综上所述,所设计的 YDFA 具备增益系数高、稳定性好、集成度高、制造成本低及易于控制等优点,为 YDFA 的设计开拓了新的思路与方向。

参考文献:

- [1] LIU H, CAO S, LIN B, et al. Comparison of different fiber amplifiers in Yb-doped fiber femtosecond optical frequency combs [J]. *Optics Communications*, 2016, 381: 403–408.
- [2] ZHOU Q, ZHOU C H, YU N, et al. Narrow-spectral-span spectral beam combining with a nonparallel double-grating structure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(9): 1–8.
- [3] 高龙, 郑伟, 安超, 等. 高可靠 1.5 μ m 全光纤相干激光测风雷达实验研究[J]. *应用光学*, 2023, 44(5): 1109–1117.
- [4] 翟东升, 汤儒峰, 黄凯, 等. 基于 G-APD 阵列的卫星激光测距系统探测性能分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 608007–608010.
- [5] 张海峰, 龙明亮, 邓华荣, 等. 多望远镜信号接收的激光测距系统探测能力[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 906002–906006.
- [6] 贾振安, 张恒, 高宏, 等. 光纤激光传感器结构发展综述 [J]. *光通信技术*, 2024, 48(1): 1–6.
- [7] LIU Q M, LIU J, MING Z, et al. Research progress on laser-assisted precision machining technology [J]. 2025, 16(2): 173–178.
- [8] KAWAHITO Y, WANG H, KATAYAMA S, et al. Ultra high power (100 kW) fiber laser welding of steel [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4667–4670.
- [9] AHMEDSYED A, MUJAHID M, MUHAMMAD Z A S. Survey and technological analysis of laser and its defense applications[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(2): 583–592.
- [10] LAI W C, MA P F, SONG J X, et al. Kilowatt-level, narrow linewidth, polarization-maintained all-fiber amplifiers based on multi-phase coded signal modulation and laser gain competition[J]. *Results in Physics*, 2021, 31(5): 1–6.
- [11] BETTI R, HURRICANE O A. Inertial-confinement fusion with lasers [J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 435–448.
- [12] DHUMIRESE, CARON J, PEREGOC, et al. Preparation of the high power laser system PETAL for experimental studies of inertial confinement fusion

and high energy density states of matter[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 688(5): 1–8.

[13] GOWDA A, BUCKLEY B, DEVORE P, et al. High fidelity pulse shaping for the national ignition facility[C]//DESY. Proceedings of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Hamburg: DESY, 2023: 1–17.

[14] 付士杰, 许海琛, 田浩, 等. 高功率和高能量脉冲单频光纤激光放大器研究进展(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(19): 17–28.

[15] ZHUR, WANG J T, ZHOU J, et al. Single-frequency high-energy Yb-doped pulsed all-fiber laser[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(9): 091402–091405.

[16] FU S J, BAI X L, SHI C D, et al. High-energy 100-ns single-frequency all-fiber laser at 1 064 nm[Z]. Fiber Lasers XV: Technology and Systems, 2018: 1–8.

[17] PATOKOSKI K, RISSANEN J, NORONEN T, et al. Single-frequency 100 ns/5 mJ laser pulses from all-fiber double clad ytterbium doped tapered fiber amplifier[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31532–31538.

[18] SHI C D, TIAN H, FU S J, et al. High-energy single-frequency pulsed fiber MOPA at 1064 nm based on a hybrid active-fiber[J]. Optics Express, 2022, 30(9): 1–8.

[19] 许党朋. 高功率高能光纤激光光场调控关键技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2017.

[20] 李灿, 张嘉怡, 任博, 等. 超快超强激光与光纤激光相干合成技术的融合发展(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(19): 94–111.

[21] BAI X L, CHEN X N, TIAN C A, et al. Theoretical analysis of thermal distribution and waveform evolution in pulsed Ytterbium-doped fiber amplifier with extra feedback[J]. Photonics, 2023, 10(4): 1–6.

[22] 温伊洁, 苏鑫杨, 徐天佳, 等. 掺镱光纤放大器性能影响因素研究[J]. 激光与光电子进展, 2024, 61(13): 1–8.

[23] FLORENT S, PIERRE G, ARNAUD P, et al. All-fiber MOPA prototype with 100 μ J temporally-shaped nanosecond-pulse and spatially coherent top-hat beam output for large-scale laser facility front end [C]//IEEE. Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose: Optica Publishing Group, 2016: 1–2.

[24] JOACHIM H, JEAN-FRANCOIS C, PERRIN A, et al. Industrial mJ-class all-fiber front end with spatially coherent top-hat beam output used as seeder for high power laser[Z]. High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology II, 2015, 9513(95130C): 1–8.

[25] ALAIN J, JEAN-FRANCOIS G, DENIS P, et al. Fiber lasers integration for LMJ[J]. Comptes Rendus Physique, 2006, 7(2): 198–212.

[26] DI NICOLA J M, SURATWALA T, PELZ L, et al. Delivering laser performance conditions to enable fusion ignition, and beyond at the national ignition facility[J]. High Energy Density Physics, 2024, 52(2): 1–18.