

文章编号 1004-924X(2015)04-0982-06

## 980 nm 高稳定度激光泵浦源控制系统

田小建, 尚祖国\*, 高博, 吴戈

(吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**设计、制作了一款 980 nm 高稳定度激光泵浦源控制系统, 以满足掺铒光纤放大器(EDFA)稳定工作的需要。首先, 以恒流激励原理设计了控制系统的驱动单元。接着, 使用半导体制冷器(TEC)作为泵浦源的温度控制手段, 设计了控制系统的温度控制单元。为了验证控制系统的有效性, 选用一款激光泵浦模块组成了完整的激光泵浦源系统。最后, 对激光泵浦源的激光输出进行了实验, 研究了光功率与驱动电流的关系, 以及系统的光功率稳定度与光谱稳定性等。对系统进行了相关测试实验, 结果显示: 应用了本控制系统的激光泵浦源的激光输出中心波长为 975.2 nm, 光功率可达 600 mW, 短期光功率稳定度为  $\pm 0.008$  dB, 长期光功率稳定度为  $\pm 0.05$  dB, 比同类激光泵浦源具有更高的稳定度。得到的结果表明: 所设计的激光泵浦源控制系统满足设计要求, 具有一定的实用价值。

**关键词:**激光泵浦源; 激光泵浦控制系统; 恒流源; 半导体温度控制; 掺铒光纤放大器

**中图分类号:** TN248.4; TN245 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.0982

## Control system for 980 nm high stability laser pump source

TIAN Xiao-jian, SHANG Zu-guo\*, GAO Bo, WU Ge

(College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding author, E-mail: shangzug@163.com

**Abstract:** A high stable control system for a 980 nm laser pump source was designed and fabricated to Er-doped optical fiber amplifiers for their stable operations. Firstly, a drive unit of the control system was designed based on the principle of a constant current excitation. Followed that, a temperature control unit of the control system was designed by using a Thermoelectric Cooler (TEC) as the measure of temperature control. Then, a complete laser pump source was assembled to verify the effectiveness of the control system. Finally, the output characteristics of the laser pump source was investigated experimentally including the relation between light power and driving current, and the stability of optical power and spectrum. The corresponding tests were performed, and results show that the center wavelength of the laser pump source is 975.2 nm, the optical power reaches 600 mW, and the power stabilities in a short-term and a long-term are  $\pm 0.008$  dB and  $\pm 0.05$  dB, respectively. As compared with the similar laser pump source, it has a high stability. It indicates that the laser pump source with the designed control system meets the design requirements, and has a certain practical value.

收稿日期: 2015-01-19; 修订日期: 2015-02-12.

基金项目: 长春市重大科技攻关计划资助项目(No. 13KG28, No. 14KG010)

**Key words:** laser pump source; laser pump control system; constant-current source; semiconductor temperature control; Er-doped Fiber Amplifier(EDFA)

## 1 引言

近年来随着光纤通信技术的发展,掺铒光纤放大器(Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA)的应用越来越广,对其稳定性的要求也越来越高。作为 EDFA 重要组成部分的激光泵浦源,其性能及稳定度对 EDFA 的工作状态有很大的影响。激光泵浦源的控制系统是泵浦源的核心,它的稳定度最终决定了输出激光的特性。因此,为了满足 EDFA 稳定工作的要求,有必要对激光泵浦源控制系统进行研究。目前,市场上的激光泵浦源产品多使用大功率半导体激光二极管(Laser Diode, LD)作为发光器件,使用半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)作为温度控制手段。应用中,主流元器件供应商多将 LD 与 TEC 封装在一起,组成 14 脚蝶形的激光泵浦模块,本文所设计的激光泵浦源控制系统就是应用于此类泵浦模块的外围控制电路。

目前,市场上高档激光泵浦源及泵浦模块产品主要由 JDSU 与 Oclaro 等国际巨头垄断,产品价格高昂,而国内生产的中档泵浦源产品则存在输出激光稳定性较低的问题。一般国产泵浦源的短期光功率稳定度为 0.05 dB,长期光功率稳定度为 0.2 dB,与中高档产品 0.01 dB、0.05 dB 的短、长期光功率稳定度水平还有一定差距。究其原因,除了应用的泵浦模块不同外,更主要的是激光泵浦源控制系统的稳定度不高<sup>[1-4]</sup>。为了解决上述问题,本文设计并制作了一款高稳定度激光泵浦源控制系统。该系统集成了驱动与温度控制两个功能,具有较高的驱动稳定度及温控能力。为了验证该激光泵浦源控制系统的控制水平,加装了泵浦模块,组成了完整的激光泵浦源。与市场同类产品相比,该激光泵浦源在光功率稳定度方面达到了中高档产品的参数水平。此外,本激光泵浦源控制系统还具有一定的普适性。在后续的研究过程中,可以通过微调控制系统的设计来适应其他不同输出参数的泵浦模块。除了上述单体激光器的应用外,设计的激光泵浦源控制系统

还可以用在以耦合方式组成的激光阵列上,通过多组协同的方式来扩展控制系统的应用范围<sup>[5]</sup>。

## 2 基本原理与系统组成

### 2.1 基本原理

激光泵浦源在 EDFA 系统中工作时,能量是按照电-光-光的顺序转换的。作为能量转换的中间环节,激光泵浦源就是一款为实现光中继提供能量的半导体激光器。由于掺铒光纤中电子的跃迁是三能级系统,为了提高转换效率、降低噪声,常选用能无受激吸收的 980 nm 波长作为激励<sup>[6-7]</sup>。此外,随着中继距离的不断提高,光源的输出功率最少要达到 400 mW 以上。

作为一种半导体激光器,激光泵浦源需要通过激励使工作物质达到粒子数反转来产生激光。常见的激励方式为电激励和光泵浦两种,其中电激励又分为恒流与脉冲两种方式。由于激光泵浦模块多使用 LD,因此选用了恒流电激励方式,所以泵浦光源控制系统的驱动单元实际就是一款高稳定度压控恒流源<sup>[8]</sup>。

在激光器工作过程中,发热对输出稳定性有较大影响。当系统工作温度  $T_w$  变化时,会影响对激光器的阈值电流密度  $J_{th}$ 。具体关系为:

$$J_{th}(T_w) = J_{th}(T_r) \exp[(T_w - T_r)/T_0], \quad (1)$$

式中:  $T_r$  为室温,  $T_0$  是激光器温度稳定性的特征温度。此外,温度还会影响输出光束的质量,当工作温度升高时,泵浦模块的光波长  $\lambda$  会发生波长偏移。目前,半导体激光器的温度控制主要使用 TEC 来实现。TEC 是以玻尔贴效应为基础,由多组电偶对(PN 结)串联制成的,在工作过程中分为冷端与热端。通过改变 TEC 上电流的大小与方向即可控制 TEC 吸、放热的速率与方向。因此,激光泵浦源控制系统的温度控制单元实际就是一款双向压控电流源<sup>[9]</sup>。

### 2.2 系统组成

激光泵浦源控制系统由驱动单元与温度控制单元两部分组成。为了直观地验证控制系统的功能及稳定性,在实验中选用了 Bookham 公司的

LC96XH74-20R 型激光泵浦模块,组成了完整的激光泵浦源。该模块具有 14 脚蝶形封装结构,内部将 LD、TEC、光电二极管(PD)与热敏电阻封装在一起。激光泵浦模块 LD 的最大驱动电流为 950 mA,最大正向电压为 2.5 V。泵浦模块上 TEC 的最大驱动电流为 1.8 A,最大电压为 3.0 V。在加入泵浦模块后,激光泵浦源的整体结构如图 1 所示。

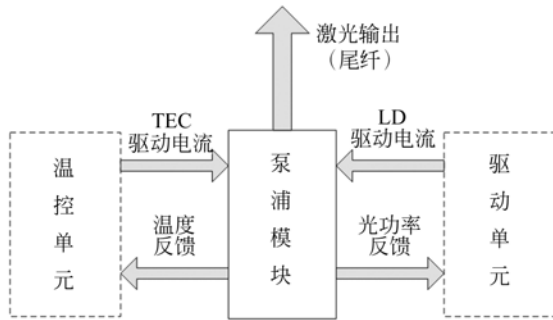


图 1 激光泵浦源结构组成

Fig. 1 Composition of laser pump source

### 2.2.1 驱动单元

驱动单元主要包括输出控制电路、驱动电路、软启动保护电路和电流显示电路等,如图 2 所示。驱动单元有两种工作模式:一是恒电流模式,以采样电阻为基础,反馈 LD 的驱动电流;二是恒功率模式,以泵浦模块内的 PD 为基础,通过串联在 PD 上的采样电阻,将光生电流转换为电压信号来反馈 LD 的输出光功率。两种模式的输出控制电路有所差别。恒电流模式采用集成运放式的驱动结构,通过反馈网络提高控制精度,形成闭环控制;而恒功率模式则采用模拟比例、积分、微分(PID)电路为驱动输出控制电路来实现高精度控制。在应用中,由于泵浦模块的输出光功率较低,恒电流模式即可满足实际需要,因此文中主要介绍恒电流模式。

在恒电流模式下,输出控制电路的控制信号经过软启动电路后,控制驱动电路输出电流,并通过采样与反馈网络纠正偏差。在驱动电路中,还使用了功率器件的并联均流技术,分散驱动电流,进一步提高了驱动电流的稳定性及系统的可靠性。在 0.6 A 的驱动输出下,用标准离差率来表示驱动电流的稳定度,测得其 1 h 短期稳定度为  $508 \times 10^{-6}$ , 8 h 长期稳定度为  $1448 \times 10^{-6}$ 。

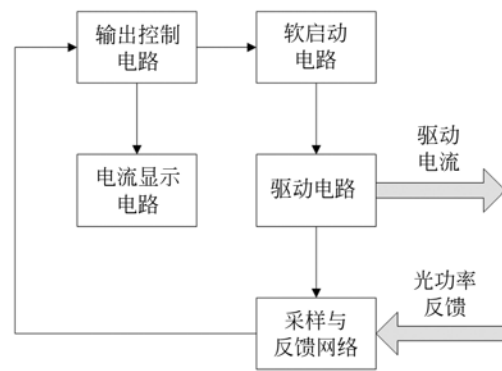


图 2 驱动单元组成

Fig. 2 Composition of drive unit

### 2.2.2 温度控制单元

温控单元是一款半导体激光器专用恒温控制器。此单元主要由温度预设电路、温度反馈电路、PID 控制电路及 TEC 输出电路组成,如图 3 所示。该单元利用热敏电阻阻值随温度变化而变化的特点,将温度反馈电路得到的代表实际温度的电压与温度预设电路的电压进行比较,然后通过模拟 PID 控制电路对电压信号进行调节,最后由桥式驱动电路控制 TEC 输出电流的大小与方向<sup>[13]</sup>。在 TEC 选定的情况下,实际的温度控制能力,即制冷量  $Q_c$  主要由 TEC 上的电流来控制。在考虑 TEC 冷、热端热传导与焦耳效应并忽略汤姆逊效应的条件下,有:

$$Q_c = Q_p - \frac{1}{2} Q_j - Q_k = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c), \quad (2)$$

式中:  $Q_j$  为焦耳热,  $Q_k$  为传导热,  $T_c$  为 TEC 冷端温度,  $T_h$  为 TEC 热端温度,  $\alpha$  为热电系数,  $K$  为热传导率,  $I$  为电流,  $R$  为内阻<sup>[10-11]</sup>。

在此单元中,为了减小结构复杂度没有选用负电压电源,而是以二分之一电源电压为基准电压,以达到控制 TEC 双向电流输出的要求。此单元的温度控制精度可达  $0.1^\circ\text{C}$ , 为保护泵浦模块,实际的 TEC 最大电流设定为 1.6 A。

## 3 实验研究

### 3.1 光功率与驱动电流的关系

驱动电流与输出光功率具有一定的相关性。为了研究其关系,使用 FOD 1202H OPTICAL

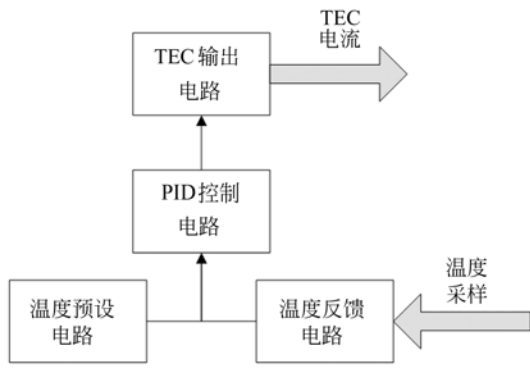


图 3 温控单元组成

Fig. 3 Composition of temperature control unit

POWER METER 型光功率计监控实际光功率,并同时记录驱动电流。为保护光功率计,在输出端还接入了 FOD 5418 OPTICAL ATTENUATOR 型衰减器,以降低光功率。在实验中,记录光功率  $P$  与驱动电流  $I$  可以得到输出电流与光功率的  $I$ - $P$  关系图,实际结果如图 4 所示。

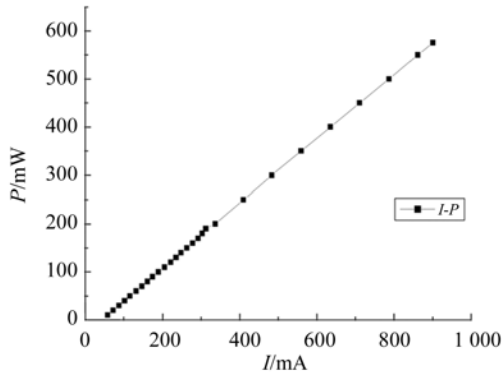


图 4 驱动电流与输出光功率的关系

Fig. 4 Relationship between drive current and optical output power

实验中,在 200 mW 的功率范围内,每隔 10 mW 记录一点;超过 200 mW 后,每隔 50 mW 记录一点,共得 28 组数据。然后,对数据进行回归分析,根据线性模型的计算方法得斜率为 0.671 7,误差为 0.001 62;功率轴截距为 -27,误差为 0.662 3。由相关系数  $R$  的计算公式:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (3)$$

得到  $R=0.999\ 92$ ,其中  $(X_i, Y_i)$  代表驱动电流与光功率的第  $i$  个数据点,  $\bar{X}, \bar{Y}$  为两数据的平均值,

$N=28$ 。由此可知,在本实验的功率与驱动电流范围内,光功率与驱动电流成线性关系。

### 3.2 光功率稳定性

在实际应用中,激光泵浦源的光功率稳定性对 EDFA 系统的稳定工作影响重大。而光功率稳定性除了与泵浦模块有关外,更主要取决于控制系统驱动电流的稳定性。这里将光功率稳定性分为短期稳定性及长期稳定性。短期稳定性以 5 min 为测试时长,选取 5 s 为步长;长期稳定性的测试时间为 8 h,以 8 min 为步长,各 60 个数据点。在室温 25 °C 的条件下,短期稳定性选取 150 mW 的光功率输出,长期稳定性选取 400 mW 为输出。

在实测过程中,短期内光功率基本无变化,输出功率稳定,最大的功率变化为 0.2 mW。长期功率稳定性数据如图 5 所示,光功率变化了 4.6 mW,驱动电流变化了 6.9 mA。对长期稳定性的数据进行高斯拟合,得到其卡方分布参数为 0.040 42,相关系数为 0.961 36。

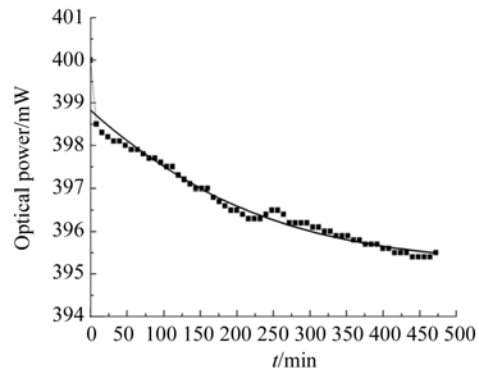


图 5 长期光功率稳定度

Fig. 5 Long-term stability of optical power

功率稳定度多使用分贝 (dB) 作为衡量单位。为了直观体现功率稳定度与功率的关系,将功率单位由毫瓦 (mW) 换算为分贝毫 (dBm)。在 3.1 倍的衰减下,其长期稳定度由 21.1 dBm 变为 21.0 dBm,变化了 0.1 dBm。根据稳定度公式:

$$S = 10 \times \log_{10} \frac{P_{\max}}{P_0}, \quad (4)$$

式中:  $S$  代表稳定度,  $P_{\max}$  为偏移功率的最大值,  $P_0$  为起始功率。经过计算可得:短期稳定度约为  $\pm 0.008$  dB,长期稳定度为  $\pm 0.05$  dB。这些数据说明该激光泵浦源具有较高的光功率稳定度,达到了市场同类中高档产品的水平,表明激光泵浦源控制系统的稳定度较高。

### 3.3 光谱稳定性

在 EDFA 系统中,激光泵浦源的中心波长与光谱稳定性对其转换效率与噪声系数的影响较大。而在激光泵浦源中,输出激光的中心波长主要由泵浦模块中集成的单模 LD 决定,而光谱稳定性主要由控制系统对模块的温度控制效果决定。

在激光泵浦源输出端加衰减器,并接入 AQ6317 型光谱分析仪,检测输出激光的中心波长,结果如图 6 所示。实测的中心波长为 975.2 nm,

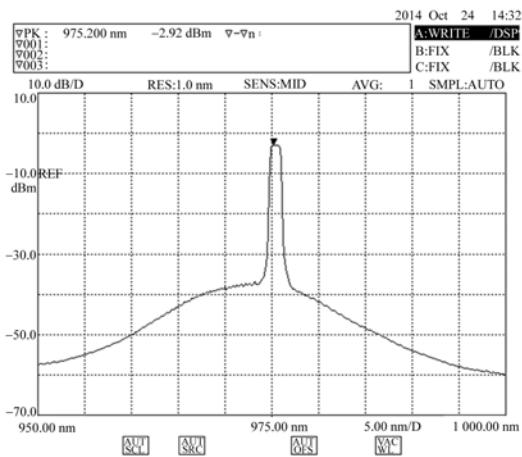


图 6 实测输出光谱图

Fig. 6 System output spectrum

### 参考文献:

- [1] 郑权, 赵岭, 钱龙生. 大功率二极管泵浦固体激光器的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 6-9. ZHENG Q, ZHAO L, QIAN L SH. Application and development of high power diode-pumped solid-state laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 6-9. (in Chinese)
- [2] PAVLOV I, ILBEY E, DULGERGIL E, et al.. High-power high-repetition-rate single-mode Er-Yb-doped fiber laser system[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9471-9475.
- [3] 于煜军, 谈新权. EDFA 用 980 nm 泵浦源的研制[J]. 激光与红外, 2001, 31(4): 219-221. GAN Y J, TAN X Q. Manufacture of 980 nm pump laser for EDFA[J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(4): 219-221. (in Chinese)
- [4] RICHARDSON D J, NILSSON J, CLARKSON W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. *JOSA B*, 2010, 27(11): B63-B92.

3 dB 光谱宽度小于 3 nm。连续开启 10 min, 中心波长有微小偏移, 偏移量为 0.1 nm, 表明应用本控制系统的激光泵浦源具有较高的光谱稳定性。整个控制系统对温度有良好的控制效果, 满足高稳定度的设计要求。

## 4 结 论

为了满足光纤通信对 EDFA 及激光泵浦源稳定工作的要求, 本文设计并制作了一款高稳定度激光泵浦源控制系统。该系统以市场常见的激光泵浦模块为对象, 在设计过程中综合考量了激光泵浦模块的实际要求, 具有一定的普适性。文中首先介绍了激光泵浦源控制系统的基本原理与系统组成。然后, 对应用此控制系统的激光泵浦源进行了输出实验研究。实验结果表明, 激光泵浦源的最高光功率可达 600 mW、中心波长为 975.2 nm, 输出光功率的短期稳定度为  $\pm 0.008$  dB, 长期稳定度为  $\pm 0.05$  dB。与市场同类产品相比, 在光功率稳定性方面具有一定优势, 达到了中高档产品的水平。由此证明了所设计的激光泵浦源控制系统具有较高的稳定度, 达到了设计要求, 具有一定的实用意义。

- [5] 郝明明, 秦莉, 朱洪波, 等. 基于半导体激光阵列的 976 nm 高功率光纤耦合模块[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 895-903. HAO M M, QIN L, ZHU H B, et al.. High power 976 nm fiber coupled module based on diode laser short bars [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 895-903. (in Chinese)
- [6] SEMMALAR S, DEVI P. Optimized gain EDFA of different lengths with an influence of pump power [C]. *Electronics, Communication and Computing Technologies (ICECCT), Tamilnadu, India: IEEE*, 2011: 90-95.
- [7] QIU T, SANDERS S J. Stabilized pump laser with output reflector on polarizing optical fiber: U. S. A, 13/740, 231[P]. 2013-1-13.
- [8] 丛梦龙, 李黎, 崔艳松, 等. 控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1629-1636. CONG M L, LI L, CUI Y S, et al.. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Opt. Precision Eng.*,

- 2010,18(7):1629-1636. (in Chinese)
- [9] 王成丽,陶智勇,方冲. 掺铒光纤放大器泵浦光源温控系统设计[J]. 光通信技术, 2012, 36(5): 24-27.  
WANG CH L, TAO ZH Y, FANG CH. A design of temperature control system of pump source for erbium-doped optical fiber amplifier [J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(5): 24-27. (in Chinese)
- [10] 胡杨,张亚军,于锦泉. 用于半导体激光器的温控电路设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 839-842.  
HU Y, ZHANG Y J, YU J Q. Design of temperature control circuit for laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 839-842. (in Chinese)
- [11] GUO W Q, TAN M Q, JIAO J, *et al.*. 980 nm fiber grating external cavity semiconductor lasers with high side mode suppression ratio and high stable frequency[J]. *Journal of Semiconductor*, 35(8):084007-1-4.

#### 作者简介:



田小建(1957—),男,吉林松原人,博士,教授,博士生导师,1982年于吉林大学获得学士学位,1988年于东北师范大学获得硕士学位,1999年于吉林大学获得博士学位,主要从事高速电子学与光电子学方面的研究。E-mail: tianxj@jlu.edu.cn



尚祖国(1989—),男,辽宁海城人,硕士研究生,2012年于吉林大学获得学士学位,主要从事光电子学方面的研究。E-mail: shangzug@163.com

(本栏目编辑:曹 金)  
(版权所有 未经许可 不得转载)