

# 工作温度对光纤激光器输出特性的影响研究

杜雪原 粟荣涛 王小林 周朴

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 通过理论分析和实验研究系统分析了工作温度对光纤激光器输出功率、光谱特性的影响。建立考虑抽运波长变化的激光器速率方程模型, 仿真分析了关键器件工作环境温度对光纤激光器输出功率的影响。在 915 nm 激光抽运下, 利用搭建实验系统测试了激光二极管(LD)、光栅、光纤等温度变化对输出激光功率、光谱的影响, 并与理论计算结果进行对比。结果表明, 理论仿真与实验结果基本一致, 光纤激光器在设定 15 °C ~ 40 °C 冷却范围内, 较稳定输出约 140 W 功率, 除了包层光滤除以外的关键点温度低于 55 °C, 具备一定的高低温工作的能力。

**关键词** 激光器; 光纤激光; 振荡器; 温度特性; 速率方程

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201542.s102004

## Research on Fiber Laser Performance Working at Different Temperatures

Du Xueyuan Su Rongtao Wang Xiaolin Zhou Pu

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** The relationship between the output performance and the working temperature of the fiber laser is studied both in theory and experiment. A numerical model based on laser rate equations concerning the change of pump wavelength is built up and used to calculate and analyze the temperature shift influence of some key components on the change of laser performance. By building the experiment configuration with 915nm wavelength pump light input, the output power and spectrum of the fiber laser are measured while changing the temperature of certain devices like laser diode (LD), grating and doped fiber. Compared with the calculation result, the experimental results suit the model simulation. The fiber laser holds working stability with about 140 W output in the set cooling range of temperature from 15 to 40 °C. The temperatures of all the key components except the pump stripper are controlled below 55 °C. The fiber laser has certain good performance under different temperature conditions.

**Key words** lasers; fiber laser; oscillator; temperature performance; rate equation

**OCIS codes** 140.3510; 060.2320; 140.3460; 140.6810

## 1 引言

光纤激光器具有转换效率高、稳定性好、光束质量好、结构紧凑、免维护等特点, 在工业加工、医疗和国防等领域得到了广泛应用<sup>[1-7]</sup>。进入 21 世纪以来, 高功率光纤激光技术得到了迅速发展, 其在高能激光系统中的巨大应用潜力也被各国军方和科研人员一致看好<sup>[8]</sup>。光纤激光器工作过程中, 温度变化是一个不可忽视的因素。环境温度会影响各部分器件的功率、波长等工作性能, 同时由于量子亏损、激光淬灭等原因<sup>[9]</sup>引起掺杂光纤自身会发热, 导致光纤介质对抽运与吸收系数的变化。

光纤激光器各部分工作温度的变化对输出特性影响主要体现在功率和光谱两个方面。温度变化会导致半导体激光二极管(LD)输出功率与波长改变, 光栅器件的中心波长漂移, 另外掺杂光纤的吸收系数会随温度变化从而影响激光输出特性。当前的研究表明, 光纤布拉格光栅对温度非常敏感, 且其中心波长偏移与环境温度变化呈线性关系<sup>[10-12]</sup>。另外, 根据光纤激光的产生机理, 光纤各能级粒子数随温度变化导致了光纤吸收截面与发

收稿日期: 2015-01-10; 收到修改稿日期: 2015-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61322505)

作者简介: 杜雪原(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器及相干合成方面的研究。E-mail: duxueyuan203@163.com

导师简介: 周朴(1984—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率光纤激光器和相干合成等方面的研究。E-mail: zhoupu203@163.com

射截面和温度有关的特性<sup>[13]</sup>, 可以通过计算求得光纤发射截面与温度同样符合近似线性关系<sup>[14-16]</sup>。

可以看出, 当前的研究主要集中在光栅的温度特性和掺杂光纤吸收系数等方面, 缺乏对半导体抽运源特性以及光纤激光器整体输出特性随温度变化的理论和实验研究。本文考虑了温度对半导体抽运激光器的影响, 建立了包含温度导致抽运波长变化的光纤激光器输出特性的理论模型; 搭建了实验系统, 分别对激光器系统整体温度变化、仅抽运源温度变化、仅掺杂光纤温度变化情况下激光器输出特性进行了详细的实验研究。结果表明, 温度变化导致的抽运其波长和功率变化是激光器输出功率变化的主要原因, 温度变化导致的光栅中心波长变化是激光器输出光谱变化的主要原因, 而掺杂光纤的工作温度变化相对而言对激光器输出功率和光谱变化影响不大。

## 2 理论模型

在光纤激光器中, 温度主要对半导体激光二极管、光纤光栅、掺杂光纤的相关参数产生影响。首先, 温度会影响 LD 的输出功率和波长, 二者均可以直接考虑在速率方程数值模型的参数中加以体现; 其次, 光栅随温度变化带来工作波长的偏移, 实际上是影响激光速率方程的边界条件; 再次, 掺杂光纤的吸收系数会受温度变化影响。当前的光纤激光速率方程中大都只考虑了抽运光为单一波长的情况<sup>[17-20]</sup>。为了体现温度对 LD 的影响, 同时考虑抽运光的光谱特性、模式耦合与竞争<sup>[17]</sup>以及光纤弯曲损耗<sup>[21]</sup>等因素, 建立了较为全面的掺镱光纤激光速率方程, 并将其离散化为

$$N_2(z) = N \frac{\Gamma_p \sum_{m=1}^M \lambda_m^p \sigma_m^{ap}(\lambda_m^p) [P_m^{p+}(\lambda_m^p, z) + P_m^{p-}(\lambda_m^p, z)] + \Gamma_s \sum_{n=1}^N \lambda_n^s \sigma_n^{as}(\lambda_n^s) [P_{n,k}^{s+}(\lambda_n^s, LP_k, z) + P_{n,k}^{s-}(\lambda_n^s, LP_k, z)]}{\Gamma_p \sum_{m=1}^M \lambda_m^p [\sigma_m^{ap}(\lambda_m^p) + \sigma_m^{ep}(\lambda_m^p)] [P_m^{p+}(\lambda_m^p, z) + P_m^{p-}(\lambda_m^p, z)] + \frac{\hbar c A_{\text{eff}}}{\tau} + \Gamma_s \sum_{n=1}^N \lambda_n^s [\sigma_n^{as}(\lambda_n^s) + \sigma_n^{es}(\lambda_n^s)] [P_{n,k}^{s+}(\lambda_n^s, LP_k, z) + P_{n,k}^{s-}(\lambda_n^s, LP_k, z)]}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_m^{p\pm}(\lambda_m^p, z)}{dz} = \Gamma_p [\sigma_m^{ep}(\lambda_m^p) N_2(z) - \sigma_m^{ap}(\lambda_m^p) N_1(z)] P_m^{p\pm}(\lambda_m^p, z) - \alpha_m^p(\lambda_m^p) P_m^{p\pm}(\lambda_m^p, z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_{n,k}^{s\pm}(\lambda_n^s, LP_k, z)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_n^{es}(\lambda_n^s) N_2(z) - \sigma_n^{as}(\lambda_n^s) N_1(z)] P_{n,k}^{s\pm}(\lambda_n^s, LP_k, z) - [\alpha_n^s(\lambda_n^s) + \alpha_n^{\text{RS}}(\lambda_n^s) + \alpha_k^{\text{bl}}(\lambda_n^s, LP_k, z)] P_{n,k}^{s\pm}(\lambda_n^s, LP_k, z) - P_{n,k}^{s\pm}(\lambda_n^s, LP_j, z) \sum_{j \neq k}^K d_{kj} + \sum_{j \neq k}^K d_{kj} P_{n,j}^{s\pm}(\lambda_n^s, LP_j, z) + 2\Gamma_s \sigma_c(\lambda_n^s, LP_k) N_2(z) \frac{\hbar c^2}{(\lambda_n^s)^3} \Delta \lambda^s, \quad (3)$$

$$N = N_1(z) + N_2(z), \quad (4)$$

式中  $N$  为掺杂光纤中掺杂离子浓度,  $N_1$ 、 $N_2$  分别为基态和激发态离子数。其中  $m, n$  分别为抽运光和信号光的波长序数,  $k$  为激光模式序数,  $z$  为光纤长度方向坐标。  $\lambda_m^p$ 、 $\lambda_n^s$  分别为第  $m$  个抽运光和第  $n$  个信号光波长。  $LP_k$  为光纤支持的第  $k$  个模式。  $P_m^{p\pm}(\lambda_m^p, z)$  为正向和反向抽运光功率,  $P_{n,k}^{s\pm}(\lambda_n^s, LP_k, z)$  分别为不同模式的正向和反向信号光功率。  $\sigma_m^{ap}$ 、 $\sigma_m^{ep}$  分别为抽运光的吸收、发射截面,  $\sigma_n^{as}$ 、 $\sigma_n^{es}$  分别为信号光的吸收、发射截面。  $\alpha_n^s(\lambda_n^s)$ 、 $\alpha_n^{\text{RS}}(\lambda_n^s)$ 、 $\alpha_k^{\text{bl}}(\lambda_n^s, LP_k, z)$  分别为信号光的吸收损耗、瑞利散射和弯曲损耗系数<sup>[21]</sup>。  $d_{kj}$  为第  $k, j$  个模式之间的耦合系数<sup>[17]</sup>。  $\Gamma_p$ 、 $\Gamma_s$  为抽运光和信号光的填充因子<sup>[22]</sup>。  $\hbar$  为约化普朗克数量,  $A_{\text{eff}}$  为纤芯有效面积,  $\tau$  为上能级寿命<sup>[19]</sup>。(3)式中的

$\alpha_k^{\text{bl}}(\lambda_n^s, LP_k, z) P_{n,k}^{s\pm}(\lambda_n^s, z)$  代表不同模式的弯曲损耗,  $P_{n,k}^{s\pm}(\lambda_n^s, LP_j, z) \sum_{j \neq k}^K d_{kj} + \sum_{j \neq k}^K d_{kj} P_{n,j}^{s\pm}(\lambda_n^s, LP_j, z)$  代表光纤支持的各个模式之间的耦合,  $2\Gamma_s \sigma_c(\lambda_n^s, LP_k) N_2(z) \frac{\hbar c^2}{(\lambda_n^s)^3} \Delta \lambda^s$  代表信号光的放大的自发辐射(ASE)项。

仿真程序基于激光速率方程, 采用差分迭代的算法, 考虑了放大自发辐射和模式竞争, 输入的数据包括

抽运光功率, 掺杂光纤吸收及发射截面、填充因子、损耗、光栅反射率等参数, 仿真得到多波长抽运对应的激光输出特性, 与实验测量结果进行对比分析。

### 3 实验研究

搭建如图 1 所示的光纤激光器实验系统, 用于研究温度变化对光纤激光器输出特性的影响。

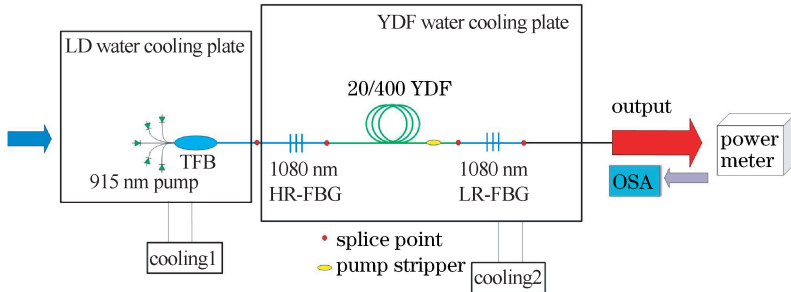


图 1 单端抽运光纤激光振荡器结构图

Fig. 1 Scheme of single end pumped fiber laser oscillator

单端抽运的全光纤激光振荡器结构如图 1 所示。激光谐振腔由高反(HR)光纤布拉格光栅(FBG, 中心波长为 1080.02 nm, 反射率大于 99.7%)和低反光栅(LR FBG, 中心波长为 1080.02 nm, 反射率约为 11.1%)共同组成。抽运源为中心波长为 915 nm 的光纤耦合半导体激光器, 输出尾纤的纤芯、包层直径分别为 200、220  $\mu\text{m}$ 。5 个 45 W[数值孔径(NA)为 0.15]半导体激光器通过  $7 \times 1$  功率合束器(TFB)后将抽运光注入 HR FBG。合束器的臂光纤纤芯、包层直径分别为 200、220  $\mu\text{m}$ , 输出尾纤纤芯、内包层直径分别为 20、400  $\mu\text{m}$ 。实验采用 25 m 纤芯、包层直径分别为 20、400  $\mu\text{m}$  的大模场双包层掺镱光纤(YDF)作为增益介质, 纤芯数值孔径为 0.06, 在 915 nm 处的吸收系数为 0.4 dB/m。在掺杂光纤和低反光栅的熔点处进行包层光滤除处理, 再通过低反光栅实现激光振荡输出。

实验中主要通过两个水冷铝板进行温度控制, 抽运 LD 和合束器固定于 LD 水冷板上, 掺杂光纤、高反和低反光栅均固定于掺杂光纤水冷板上。LD 水冷板和掺杂光纤水冷板分别用不同的水冷机进行温度控制。实验中利用上述方式改变器件工作温度, 在激光输出端用功率计测量输出功率, 利用后向散射光观察光谱特性。实验中, 一是控制 LD 部分(LD 水冷板)温度不变时改变光纤部分(掺杂光纤水冷板)温度; 二是控制光纤部分温度不变, 改变 LD 温度。实验中选取了抽运与最高功率输出情况(LD 处于 9 A 工作电流)的实验结果。除此之外还单独测量了抽运 LD 的输出功率和输出光谱进行对照分析。值得一提的是, 进行温度控制时, 各部分的实际温度与设定温度存在偏差, 但是温度增加或减少的总体变化趋势是固定的。

首先, 将 LD 水冷板设定为 25 $^{\circ}\text{C}$  不变, 该温度下 LD 的总输出功率为 210.6 W。控制掺杂光纤水冷板温度以 5 $^{\circ}\text{C}$  间隔在 15 $^{\circ}\text{C}$ ~40 $^{\circ}\text{C}$  范围内变化, 测量多组数据并记录输出功率和光谱特性, 同时监测掺杂光纤和包层光滤除点的温度。功率变化和关键点(光纤温度最高点和包层光滤除点)温度如图 2 所示; 输出光谱如图 3 所示。

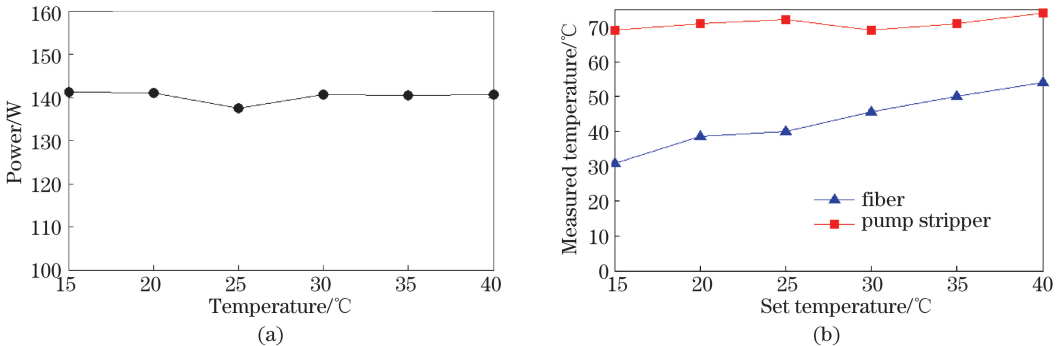


图 2 掺杂光纤水冷板处于不同温度时, (a) 功率-温度变化特性; (b) 关键点温度(掺杂光纤和包层光滤除点)

Fig. 2 (a) Power-temperature line chart and (b) temperature chart of some key points (fiber and pump stripper) when fiber board working at different temperatures

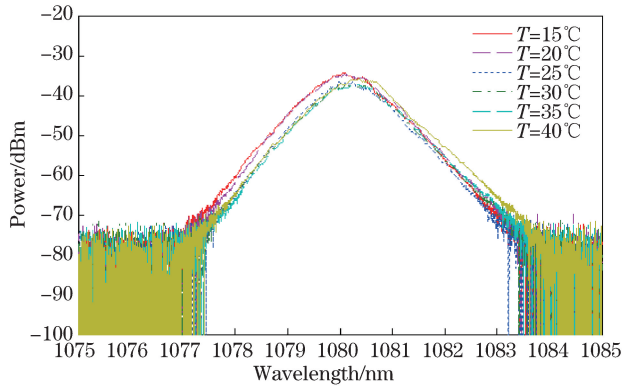


图 3 掺杂光纤水冷板处于不同温度时激光器输出光谱特性

Fig. 3 Spectrum of fiber laser while fiber board working at different temperatures

从图 3 中可以直观发现,控制 LD 工作温度不变而改变光纤及光栅工作温度时,光纤激光器输出的激光功率基本保持不变,光谱向长波方向漂移约为 0.4 nm。为判断上述情况导致波长漂移的主导因素是掺杂光纤的吸收截面抑或是光纤光栅的工作波长偏移,对掺杂光纤和光栅分别进行温度控制,测量发现在室温的有限变化范围内(15°C~40°C),实验中采用的掺杂光纤吸收截面的变化对输出激光特性的影响几乎可以忽略不计,激光输出特性主要受光纤光栅的器件温度特性影响。

利用实验测量得到的光谱数据,处理分析温度变化导致的激光中心波长漂移。为消除随机测量误差,通过对光谱图截取 3dB 衰减线的方式确定峰两侧对应的 3dB 衰减波长位置,对二者取平均值可看作中心波长位置。由此可得温度变化对应的中心波长漂移如图 4 所示,该波长漂移是光栅与掺杂光纤工作温度变化的共同作用的结果。对其进行线性拟合,斜率为 0.009943,即波长漂移率约为 9.94pm/°C。

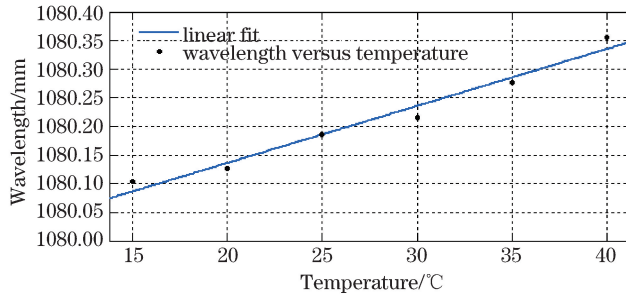


图 4 波长对温度变化的线性拟合图

Fig. 4 Linear fit of laser working wavelength versus temperature

其次,实验中测量了所使用的 LD 的温度特性,发现随着 LD 温度升高,除了功率下降之外,LD 输出波长向长波方向移动约为 7nm。图 5 表示工作在 9A 电流下,随温度变化抽运 LD 的输出光谱。可以发现,改变工作温度时,LD 工作波长存在明显漂移现象。

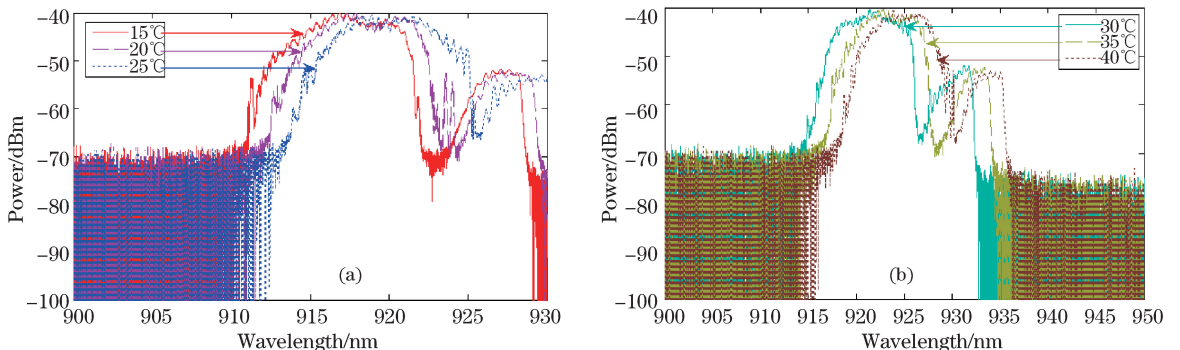


图 5 LD 处于不同温度工作时输出光谱对比图。(a)15、20、25°C 时 LD 输出光谱;(b) 30、35、40°C 时 LD 输出光谱  
Fig. 5 Spectra of laser diode while working at different temperatures. (a) Spectra of the LD in 15 °C、20 °C、25 °C;  
(b) spectra of the LD in 30 °C、35 °C、40 °C

将掺杂光纤水冷板设定为 25℃ 不变;通过控制 LD 水冷板温度以 5℃ 间隔在 15℃~40℃ 范围内变化来改变 LD 的工作温度,测量多组数据并记录输出功率和光谱特性,同时监测 LD 壳体的温度。激光输出功率、对应的抽运功率以及 LD 温度变化如图 6 所示,图 7 为对应的输出光谱。

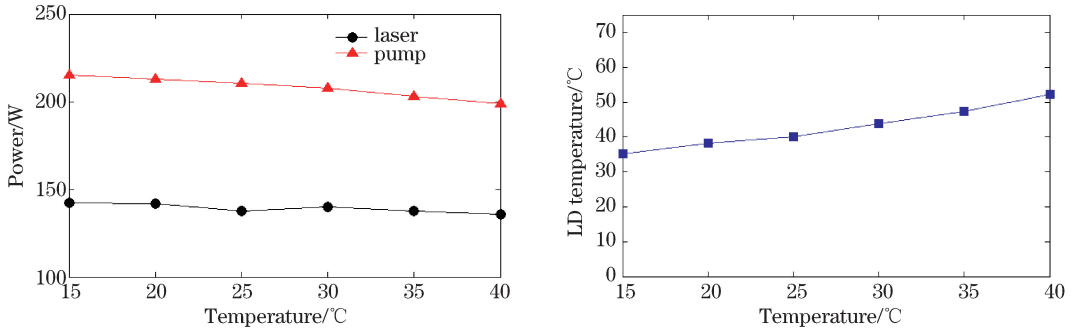


图 6 LD 水冷板处于不同温度时, (a)抽运和输出激光功率-温度变化特性和(b)LD 温度  
Fig. 6 (a) Power-temperature line chart of LD output and laser output, and (b) temperature chart of LD, when LD board works at different temperatures

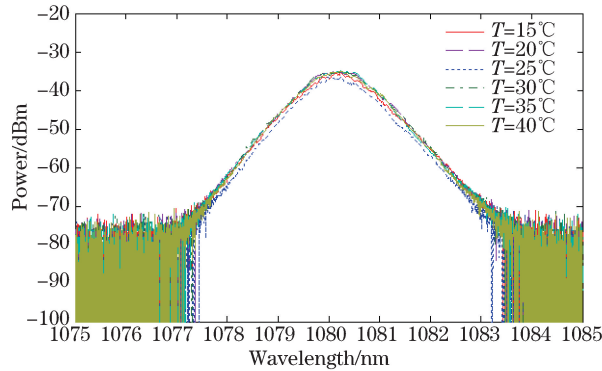


图 7 LD 水冷板处于不同温度时激光光谱对比图

Fig. 7 Spectra of fiber laser while the LD board works at different temperatures

可以发现此种情况下,LD 工作温度的变化会导致抽运激光的功率下降且波长向长波方向漂移数个纳米。而对于整个光纤激光器而言,LD 的温漂仅导致激光输出功率略微下降,输出激光波长不发生偏移。

结合理论模型,利用 LD 处于不同温度下的功率和光谱数据进行仿真分析,可以计算得激光器输出功率,并与实验测量结果比较,如图 8 所示。横坐标为温度,图中方块和三角数据点分别为激光功率的仿真结果和实验测量结果,圆点对应抽运功率,仿真和实验结果的变化趋势基本一致,对比得误差约为 10%。

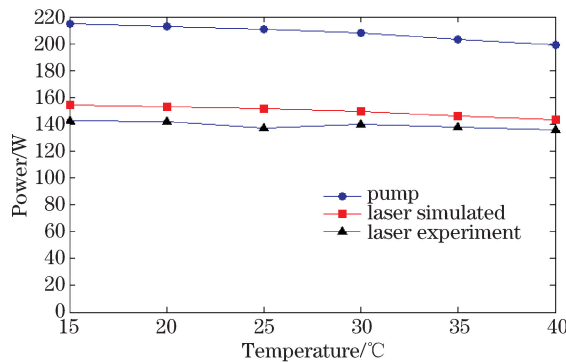


图 8 LD 处于不同温度时激光功率与仿真结果对比图

Fig. 8 Output power comparison chart of experiment versus simulation when LD works at different temperatures

综合分析工作环境温度变化对激光输出特性的影响,在正常环境温度条件下的振荡器结构光纤激光器,当其谐振腔部分(包括掺杂光纤与光栅)的工作温度升高,由于光栅的器件温度特性会导致输出激光光谱向



长波方向移动,对激光输出功率几乎没有影响;而当作为抽运源的 LD 工作温度升高的情况下,LD 的自身温度特性会导致抽运功率下降且伴随数纳米的波长红移,抽运功率的降低以及波长漂移导致激光器的抽运效率下降,最终激光输出功率下降,输出激光波长基本不受 LD 工作温度变化影响。

实验与仿真结果的误差约为 10%。通过误差分析,误差产生的原因一方面在于仿真结果中未考虑光栅的损耗。除此之外,在单端抽运光纤激光振荡器搭建的过程中,抽运合束器、光栅与掺杂光纤熔接的位置不可避免的会引入高阶模式等额外损耗。

## 4 结 论

通过理论和实验对光纤激光器各关键部分工作温度变化对激光输出的功率、光谱特性的影响进行了详细研究。实验中理论仿真与测量结果基本一致,分析得出 LD 的温度特性会影响激光器功率输出,而谐振腔部分(掺杂光纤与光栅)的工作温度变化是影响输出光谱中心波长漂移的主要因素。与此同时实现了光纤激光器在设定 15℃~40℃ 工作温度范围内约为 140 W 的功率稳定输出。

## 参 考 文 献

- 1 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Cheng, *et al.*. 1.6kW ytterbium doped all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416001.  
闫平,肖起榕,付晨,等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416001.
- 2 Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao, *et al.*. 1.75-kilowatt continuous-wave output fiber laser using homemade ytterbium-doped large-code fiber [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1277.  
楼祺洪,何兵,薛宇豪,等. 1.75kW 国产掺 Yb 双层光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1277.
- 3 Liu Zejin, Leng Jinyong, Guo Shaofeng, *et al.*. All fiber 2kW near-single-mode fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908003.  
刘泽金,冷进勇,郭少锋,等. 全光纤结构 2kW 准单模光纤激光器[J]. 中国激光. 2013, 40(9): 0908003.
- 4 Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen, *et al.*. High power fiber laser with output power more than 1.2kW [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(10): 1359.  
赵鸿,周寿桓,朱辰,等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2kW[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 1359.
- 5 D J Richardson, J Nilsson, W A Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. J Opt Soc Am B, 2010. 27 (11): B63-B92.
- 6 Duan Kailiang, Zhao Baoyin, Zhao Wei, *et al.*. All fiber 1000W fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3219.  
段开棕,赵保银,赵卫,等. 1000W 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3219.
- 7 Li Wei, Wu Zichun, Chen Xi, *et al.*. High power fiber laser with output power breaking through 1kW [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(6): 890.  
李伟,武子淳,陈曦,等. 大功率光纤激光器输出功率突破 1kW[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 890.
- 8 Liu Zejin, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. The history, development and trend of coherent combining of laser beams [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2221-2234.  
刘泽金,周朴,王小林,等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2221-2234.
- 9 Chen Shuang, Feng Ying. Temperature distribution in high power photonic crystal fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(06): 1134-1138.  
陈爽,冯莹. 高功率光子晶体光纤激光器温度分布研究[J]. 光子学报, 2008, 37(06): 1134-1138.
- 10 Cheng Can, Xin Guofeng, Pi Haoyang, *et al.*. Measurement of thermal relaxation time of high power semiconductor lasers [J]. Chinese J Lasers, 2007, 33(12): 1671-1674.  
程灿,辛国锋,皮浩洋,等. 大功率半导体激光器热弛豫时间的测量[J]. 中国激光, 2007, 33(12): 1671-1674.
- 11 Hecht J. Understanding Fiber Optics (fourth edition) [M]. Columbus: Prentice Hall, 2002.
- 12 Yong Zhao, Yanbiao Liao. Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors [J]. Optics and Lasers in Engineering. 2004, 41(1): 1-18.
- 13 Jiang Qiuji, Yan Ping, Zhang Jing, *et al.*. Analysis on thermal characteristic of ytterbium doped fiber lasers [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6): 827-829.  
蒋秋洁,闫平,张金戈,等. 掺镱光纤激光器温度特性分析[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 827-829.
- 14 Maxim Bolshtyansky, Paul Wysocki, Nicholas Conti. Model of temperature dependence for gain shape of erbium-doped fiber amplifiers [J]. Journal of Lightwave Technology. 2000, 18(11): 1533-1540.
- 15 D A Gruk, A S Kurkov, V M Paramonov, *et al.*. Effect of heating on the optical properties of Yb<sup>3+</sup>-doped fibres and fibre lasers [J]. Quantum Electronics. 2004, 34(6): 579-582.
- 16 M Bell, N Kaurova, A Divoichiy. On the nature of resistive transition in disordered superconducting nanowire [J]. IEEE Transactions on Applied Super Conductivity. 2007, 17(2): 267-271.
- 17 M Gong, Y Yuan, C Li, *et al.*. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3236-3246.

- 18 I Kelson, A Hardy. Optimization of strongly pumped fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 891—897.
- 19 Yong W, Hong P. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(10): 2262—2270.
- 20 Kelson I, Hardy A. Strongly pumped fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(9): 1570—1577.
- 21 R T Schermer, J H Cole. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 43(10): 899—909.
- 22 O G Okhotnikov. *Fiber lasers*[M]. Germany: Wiley-VCH, 2012.

栏目编辑: 宋梅梅