

## 不同泵浦波长光纤激光器模式不稳定效应对比

万颖超<sup>1</sup>, 杨保来<sup>1,2,3</sup>, 奚小明<sup>1,2,3</sup>, 张汉伟<sup>1,2,3</sup>, 叶云<sup>1,2,3</sup>, 王小林<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;
2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南长沙 410073;
3. 高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 一般认为, 光纤激光器模式不稳定效应主要来自于泵浦源量子亏损和增益光纤泵浦吸收所产生的热效应。理论分析了光纤中的热源, 发现诱发模式不稳定的热效应主要来源于泵浦吸收, 其次是量子亏损; 利用课题组开发的仿真软件 SeeFiberLaser 对该结论进行仿真。仿真结果表明: 泵浦吸收系数越低, 光纤中的最高温度和温度梯度越低, 越有利于抑制热致折射率光栅的形成, 提高模式不稳定阈值。搭建了纤芯/包层直径为 30/400  $\mu\text{m}$  的前向泵浦掺镱光纤激光振荡器, 对比研究了中心波长为 976 nm、915 nm 和 940 nm 的泵浦源泵浦时激光器的模式不稳定阈值特性。结果表明, 分别采用中心波长为 976 nm、915 nm 和 940 nm 的半导体激光器作为泵浦源时, 激光器模式不稳定阈值分别为 279 W、502 W 和 697 W, 光光转化效率分别为 67.7%、61% 和 63%。由此可以发现, 泵浦吸收系数对模式不稳定阈值的影响大于量子亏损对模式不稳定阈值的影响, 通过改变泵浦波长降低泵浦吸收系数可以有效提升模式不稳定阈值。优化泵浦波长, 兼顾量子效率和泵浦吸收系数, 是光纤激光器实现高光束质量高模式不稳定阈值的重要技术路线之一。

**关键词:** 光纤激光器; 模式不稳定; 热效应; 泵浦吸收系数

**中图分类号:** O436      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210256

## Transverse mode instability effect of fiber lasers with different pump wavelengths

Wan Yingchao<sup>1</sup>, Yang Baolai<sup>1,2,3</sup>, Xi Xiaoming<sup>1,2,3</sup>, Zhang Hanwei<sup>1,2,3</sup>, Ye Yun<sup>1,2,3</sup>, Wang Xiaolin<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, China;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** It is generally believed that the transverse mode instability (TMI) of fiber laser mainly comes from the thermal effect caused by the quantum defect of the pump source and the pump absorption of gain fiber. Theoretically, based on the analysis of the heat source in optical fiber, it was found that the thermal effect of induced mode instability mainly comes from pump absorption, followed by the quantum defect. And the simulation software SeeFiberLaser developed by the research group was used to verify the conclusion. The

收稿日期: 2022-01-20; 修订日期: 2022-02-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (62005315); 长沙市杰出创新青年培养计划 (kq2009004)

作者简介: 万颖超, 男, 硕士生, 主要从事高功率光纤激光器技术方面的研究。

通讯作者: 王小林, 男, 副研究员, 博士, 主要从事高功率光纤激光器技术方面的研究。

simulation results showed that the lower the pump absorption coefficient, the lower the maximum temperature and temperature gradient in the fiber, the more beneficial it was to restrain the formation of thermally induced refractive index grating and increase the TMI threshold. Experimentally, a co-pumped ytterbium-doped fiber laser oscillator with a core/inner cladding diameter of 30/400  $\mu\text{m}$  was built and comparatively studied on TMI threshold characteristics of lasers pumped by laser diodes (LDs) with central wavelengths of 976 nm, 915 nm and 940 nm. The results showed that when 976 nm LD, 915 nm LD and 940 nm LD were used as pump sources, the laser TMI threshold was 279 W, 502 W and 697 W respectively, and the laser optical-to-optical (O-O) conversion efficiency was 67.7%, 61% and 63%, respectively. It was be found that the influence of the pump absorption coefficient on the TMI threshold was greater than that of the quantum defect on the TMI threshold, and the TMI threshold could be effectively increased by changing the pump wavelength and reducing the pump absorption coefficient. Optimizing pump wavelength, taking into account both quantum efficiency and pump absorption coefficient, was one of the important technical routes for fiber lasers to achieve high beam quality and high mode instability threshold.

**Key words:** fiber laser; transverse mode instability; thermal effect; pump absorption coefficient

## 0 引 言

光纤激光器以其优良的光束质量、可柔性操作、热管理方便、结构紧凑等优点广泛应用于工业加工、医疗卫生、基础研究等领域<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着高亮度泵浦源、光纤器件制造水平、光纤拉制工艺等技术的发展,光纤激光器的输出功率得到了迅速提升<sup>[3-8]</sup>。长期以来,受激拉曼散射等非线性效应和模式不稳定效应严重制约了光纤激光器功率水平的进一步提升。自 2010 年德国耶拿大学首次公开报道模式不稳定现象之后,研究人员逐步意识到模式不稳定效应已经成为限制高功率光纤激光器功率提升的重要因素之一<sup>[9]</sup>。

模式不稳定效应是指当激光器泵浦功率超过某一阈值时,激光器中的基模与高阶模发生动态耦合的现象。模式不稳定现象发生后,信号光经包层光滤波器之后会出现功率滞涨、时域起伏、光束质量退化等现象,严重影响了光纤激光器功率的提升。近年来,研究人员针对模式不稳定现象进行了大量的理论和实验研究,对模式不稳定物理机理和影响因素认识逐步深入并提出了一些有效的抑制方法<sup>[10-13]</sup>。目前,研究人员普遍认为光纤中废热导致的热效应是高功率光纤激光器中产生模式不稳定的根源。

通常认为,激光介质内的主要发热因素是抽运光子与激光光子之间的能量亏损,即量子亏损。首先,

从光纤中的热量计算公式出发,推理出光纤中的热量不仅与量子亏损有关,还与增益光纤的吸收系数相关。利用光纤激光器仿真软件 SeeFiberLaser 仿真了不同波长泵浦光纤激光器时增益光纤中的热量分布情况<sup>[14]</sup>。结果表明,采用不同泵浦源时,泵浦吸收系数越低增益光纤中的温度及温度梯度越低。这说明,泵浦吸收系数对光纤激光器模式不稳定阈值的影响比量子亏损对模式不稳定阈值的影响更大。最后,在理论研究基础上搭建了前向泵浦掺镱光纤激光振荡器,对比研究了 915、940、976 nm LD 分别泵浦时激光器的模式不稳定阈值特性,实验结果与理论相吻合,为进一步提高模式不稳定阈值,获得更高功率光纤激光器提供了有效参考。

## 1 理论模型与仿真

增益光纤中的热负荷是产生模式不稳定效应的根源。在增益光纤内部的热源可以描述为<sup>[15]</sup>:

$$Q(r, z) = \frac{\nu_p - \nu_s}{\nu_p} \left[ N_0 \sigma_{ap} - (\sigma_{ep} + \sigma_{ap}) N_2(r, z) \right] \frac{P_p(r, z)}{A_p} + \alpha_s(r) I_s(r, z) \quad (1)$$

式中:  $Q$  为光纤中的热量;  $r$  为光纤半径;  $z$  为光纤轴向距离;  $N_0$  为掺杂粒子浓度;  $N_2$  为上能级粒子数;  $\nu_p$  和  $\nu_s$  为泵浦光和信号光的频率;  $\sigma_{ap}$  和  $\sigma_{ep}$  为泵浦光的吸收和发射截面;  $P_p(r, z)$  为泵浦光功率;  $A_p$  为传输泵浦

光的内包层面积;  $\alpha_s(r)$  为信号光吸收损耗系数;  $I_s(r,z)$  为信号光强。

在实际应用中,一般采用泵浦吸收系数  $\beta_p(\lambda)$  对光纤的吸收特性进行描述,考虑到泵浦吸收系数与泵浦吸收截面之间的关系:

$$\sigma_{ap}(\lambda) = \frac{\beta_p(\lambda)}{N_0 k_0 \Gamma_p} \quad (2)$$

将公式 (2) 代入公式 (1), 增益光纤内部的热源可以描述为<sup>[16]</sup>:

$$Q(r,z) = \frac{\nu_p - \nu_s}{\nu_p} \left[ \frac{\beta_p(\lambda)}{k_0 \Gamma_p} - (\sigma_{ep} + \sigma_{ap}) N_2(r,z) \right] \frac{P_p(r,z)}{A_p} + \alpha_s(r) I_s(r,z) \quad (3)$$

式中:  $k_0$  为常数 4.34;  $\Gamma_p$  为泵浦填充因子。

从公式 (3) 可以看到, 光纤中的热源不仅来源于量子亏损, 还与增益光纤的泵浦吸收系数有关。为了降低光纤中的热量、抑制模式不稳定效应, 一方面可以提高激光器的量子效率, 另一方面还可以降低增益光纤的泵浦吸收系数。一直以来, 人们都认可提高量子效率可以提升模式不稳定阈值的方案, 但对于降低泵浦吸收系数提高模式不稳定阈值的认识不够深入。在实验中发现, 光纤激光器在采用 915 nm LD 泵浦时比采用 976 nm LD 泵浦时具有更高的模式不稳定阈值<sup>[17]</sup>。这说明量子效率并不是影响光纤激光器热致模式不稳定阈值的主要因素, 泵浦吸收系数对模

式不稳定阈值的影响比量子亏损对模式不稳定阈值的影响可能更大。为进一步揭示量子亏损和泵浦吸收系数对模式不稳定阈值的影响, 根据理论模型, 利用课题组开发的光纤激光仿真软件 SeeFiberLaser 对不同泵浦波长情况下光纤激光器中的热量进行了仿真计算。

由镱离子的吸收发射截面可知, 当使用同一根光纤时, 泵浦源波长不同, 吸收系数则不同。根据实验室现有泵浦源, 分别仿真了 915、940、976 nm LD 泵浦时增益光纤中的热量情况。在 SeeFiberLaser 软件中搭建激光器结构如图 1 所示, 各连接点的损耗均为 0, 环境温度为 25 °C, 换热系数为 1200 W/(m<sup>2</sup>·K)。为更好的贴近现实, 各器件参数设置参照实验所使用器件参数, 主要参数设置如下: 连续泵浦源波长分别为 915、940、976 nm, 注入功率为 1200 W, 3 dB 带宽为 3 nm; 前向泵浦合束器平均泵浦效率 98%, 信号传输效率 98%; 双包层光纤光栅中心波长均为 1080 nm, 尾纤纤芯和包层直径分别为 30 μm 和 400 μm, 反射率分别为 99.9% 和 10%, 3 dB 反射带宽为 4 nm 和 1.7 nm; 双包层掺镱光纤的纤芯包层直径分别为 30 μm 和 400 μm, 915 nm 处的吸收系数为 0.88 dB/m, 在 976 nm 处的吸收系数为 2.73 dB/m, 940 nm 处的吸收系数为 0.68 dB/m, 长度为 20 m; 光纤端帽反射率为 0。



图 1 SeeFiberLaser 仿真结构图

Fig.1 SeeFiberLaser simulation structure diagram

仿真结果如图 2 所示, 其中图 2(a)~(c) 分别为 915、940、976 nm LD 泵浦时纤芯和包层中的温度变化图。从图中可以看到, 光纤所达到的最高温度分别 70.93、53.26、110.89 °C, 温度差异明显, 最高相差约 57 °C, 温差的主要来源为量子亏损和泵浦吸收系数。对比可以发现, 量子效率最高的 976 nm LD 泵浦时, 光纤的温度和温度梯度最高, 量子效率最低的

915 nm LD 泵浦时, 光纤中的温度和温度梯度处于中间位置; 对比吸收系数, 吸收系数最高的 976 nm LD 泵浦时, 光纤中的温度和温度梯度最高, 吸收系数最低的 940 nm LD 泵浦时, 光纤中的温度和温度梯度最低。所以, 相比于量子亏损, 吸收系数对光纤中的温度及温度梯度影响更大。高功率光纤激光器的模式不稳定主要是由于光纤中的废热所产生的热致

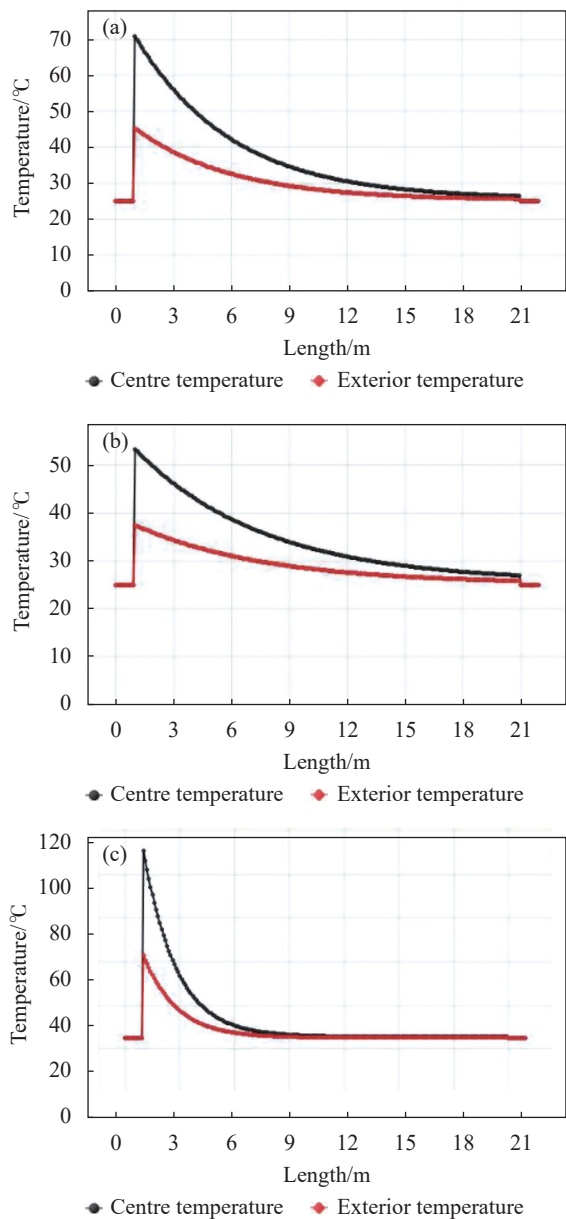


图 2 纤芯和包层中的温度变化

Fig.2 Variation of temperature in core and cladding

折射率光栅。而光纤中的温度和温度梯度越高,越容易引起光纤的热致折射率变化,从而形成热致折射率光栅,降低模式不稳定阈值<sup>[18]</sup>。综上,泵浦吸收系数对光纤激光器模式不稳定阈值的影响比量子亏损对模式不稳定阈值的影响更大。

## 2 实验结构

为了研究不同波长泵浦时激光器的模式不稳定阈值特性,搭建了如图 3 所示的前向泵浦光纤激光振荡器。1 组 750 W 的 976 nm LD、2 组 750 W 的 915 nm LD 和 2 组 680 W 的 940 nm LD 通过 (6+1)×1 前向合束器 ((6+1)×1 FPSC) 注入到激光器谐振腔中。谐振腔由掺镱双包层光纤 (YDF) 和一对中心波长为 1 080 nm 的光纤光栅构成。其中高反射率光纤光栅 (HR FBG) 反射率为 99.9%, 3 dB 带宽为 4 nm; 低反射率光纤光栅 (OC FBG) 反射率为 10%, 3 dB 带宽为 1.7 nm。掺镱双包层光纤的纤芯包层的直径分别为 30 μm 和 400 μm, 在 915 nm 处的吸收系数为 0.88 dB/m, 长度为 20 m。实验中,为了增加高阶模式的损耗,将掺镱双包层光纤最小弯曲直径设定为 85 mm。谐振腔中产生的激光经过包层光滤除器 (CLS) 后从光纤端帽 (Endcap) 输出。包层光滤除器将激光器中未吸收的泵浦光和诱发模式不稳定效应的高阶模式滤除。为了避免反馈光导致激光器自激,对 (6+1)×1 前向合束器的信号臂切 8°斜角。输出激光经准直后,通过一个分束系统将激光注入功率计 (PM)、光谱仪 (OSA)、示波器 (PD) 和光束质量测试仪 (Beam Squared) 中,分别测量和记录输出功率、光谱、时域以及光束质量  $M^2$  因子。

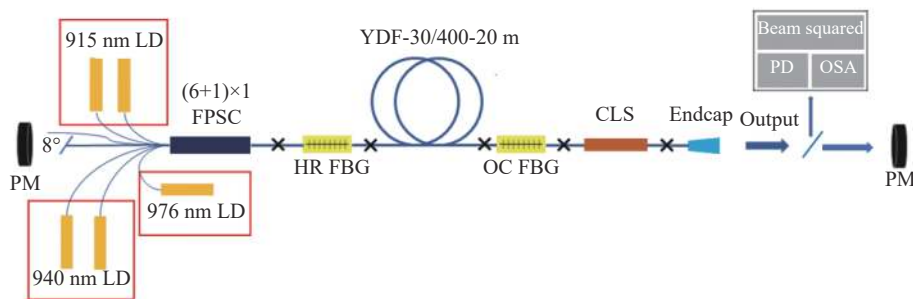


图 3 光纤激光振荡器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of fiber laser oscillator



### 3 实验结果及分析

自模式不稳定现象公开报道之后,研究人员从多个方面对模式不稳定现象展开分析,大量实验研究表明,高功率光纤激光器中模式不稳定阈值具有明显的“阈值性”<sup>[19]</sup>。模式不稳定阈值附近的时域特性具有“周期性”,特征频率耦合在 kHz 量级,输出信号光经包层光滤波器之后功率滞涨等特征<sup>[20]</sup>。利用模式不稳定这些特征属性,可以准确的判定模式不稳定阈值。实验中,由于采用了小弯曲结构盘绕增益光纤和包层光滤波器过滤高阶模,在达到模式不稳定阈值之后不会出现光束质量下降现象。

实验中,首先采用工业高效率激光器泵浦源 976 nm LD 作为该振荡器的泵浦源进行实验,得到实验结果如图 4 所示。图 4(a) 为不同泵浦功率情况下输出功率及对应的光光转换效率。可以看到,在低功率时输出功率随泵浦功率成线性增长趋势,但是当泵

浦功率达到 412 W 之后,输出功率出现下降,对应的光光转化效率由最高时的 67% 下降到 48%。利用光谱仪测量得到的光谱数据如图 4(b) 所示,光谱中没有明显的拉曼成分,故功率降低与光光转化效率下降与受激拉曼散射效应无关。利用光电探测器测量输出功率为 279 W 时的时域信号以及傅里叶变换后的频域信号如图 4(c) 所示。在泵浦功率为 412 W,输出功率为 279 W 时,时域上没有观测到明显的波动,频域也没有出现模式不稳定效应特征峰。图 4(d) 为泵浦功率 483 W,输出功率 235 W 时的时频域信号,结果显示,在泵浦功率为 483 W 时,时域上出现周期性的起伏,频域上可以观察到明显的模式不稳定效应特征峰。在泵浦功率为 483 W 时测得光斑形态如图 4(e) 所示,对应的光束质量因子为  $M^2_x=1.4$ 、 $M^2_y=1.4$ 。根据实验中测得的功率和光光转化效率下降现象和时频域信号,可以判定 976 nm LD 作为泵浦源时,该振荡器的模式不稳定阈值约为 279 W。

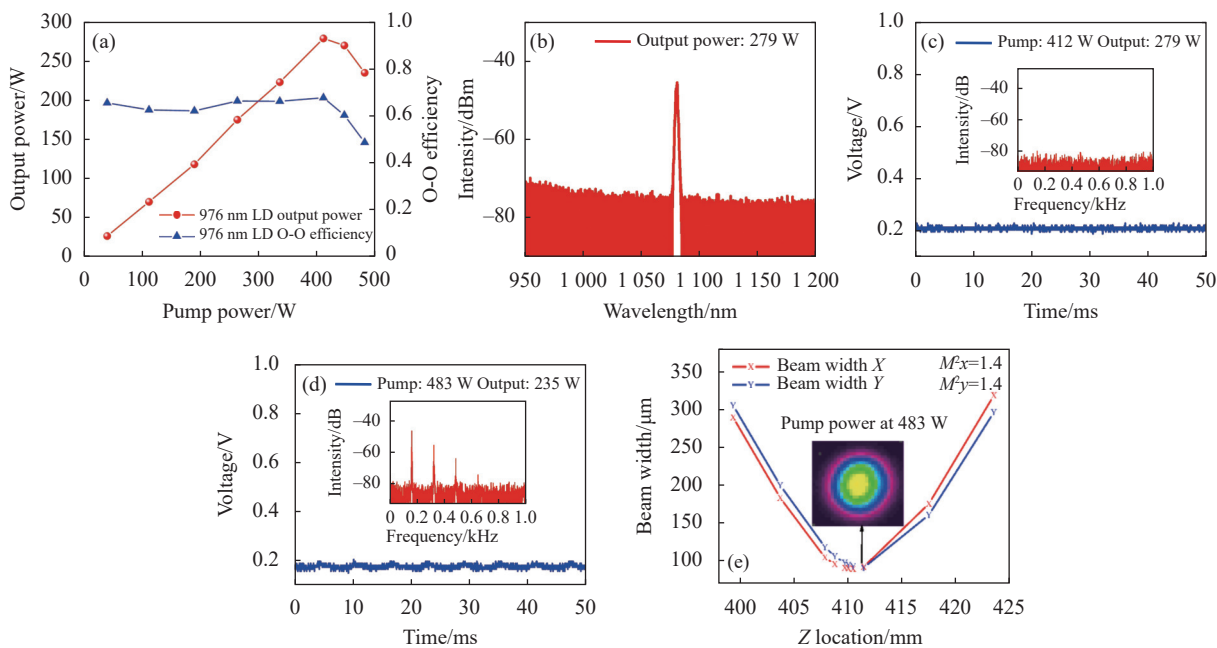


图 4 976 nm LD 泵浦时光纤激光器振荡器输出特性。(a) 不同泵浦功率条件下输出功率及光光转换效率;(b) 输出功率为 279 W 时的光谱;(c)-(d) 输出功率分别为 279 W 和 235 W 时的时频域信号;(e) 泵浦功率为 483 W 时的光束质量因子及光斑形态

Fig.4 Output characteristic of fiber oscillator when pumped with 976 nm LD. (a) Output power and optical-to-optical(O-O) efficiency under different pump power; (b) Optical spectrum at the output power of 279 W; (c)-(d) Time domain signals and their Fourier spectra at the output power of 279 W and 235 W, respectively; (e) Beam quality factor and beam profile when the pump power is 483 W

随后采用工业应用中稳定性较好的激光器泵浦源 915 nm LD 对光纤激光器进行泵浦,得到实验结果

如图 5 所示。图 5(a) 为不同泵浦功率情况下输出功率及对应的光光转换效率曲线。可以看到,与 976 nm

LD 泵浦时类似, 在低功率时输出功率随泵浦功率成线性增长趋势, 在泵浦功率为 912 W 时, 最高输出功率达到 502 W。当泵浦功率继续增加到 952 W 时, 输出功率下降为 468 W, 对应的光光转化效率从最高时的 61% 下降到 49%。利用光谱仪测量得到的光谱数据如图 5(b) 所示, 由于功率较低光谱中没有明显的拉曼成分, 故功率降低和光光转化效率下降与受激拉曼散射效应无关。利用光电探测器测量输出功率为 399 W 时的时域信号以及傅里叶变换后的频域信号如图 5(c) 所示。在泵浦功率为 749 W, 输出功率为

399 W 时, 时域上没有观测到明显的波动, 频域也没有出现模式不稳定特征峰。图 5(d) 为泵浦功率 912 W, 输出功率 502 W 时的时频域信号, 可以看到, 时域上出现周期性的起伏, 频域上可以观察到明显的模式不稳定效应特征峰。在泵浦功率为 952 W 时测得激光器远场光斑形态如图 5(e) 的插图所示, 对应的光束质量因子为  $M^2_x=1.5$ 、 $M^2_y=1.5$ 。根据实验中测得的功率和光光转化效率下降现象以及光谱和时频域信号, 使用 915 nm LD 泵浦时, 该激光器的模式不稳定阈值约为 502 W。

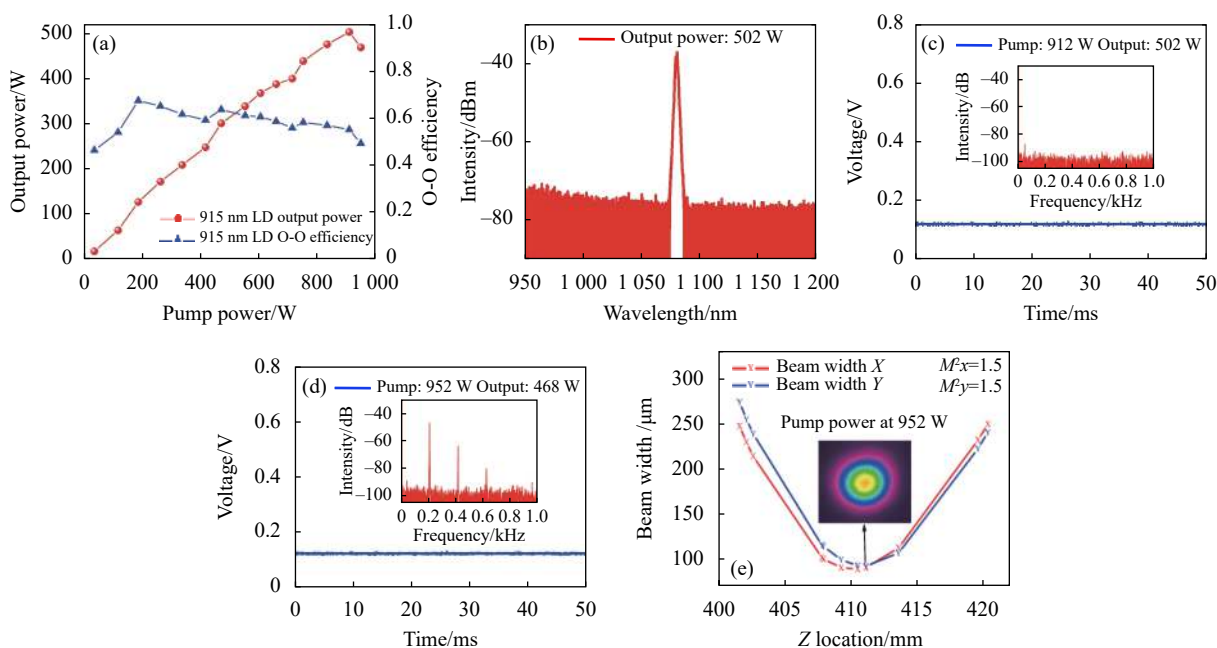


图 5 915 nm LD 泵浦时光纤激光振荡器输出特性。(a) 不同泵浦功率条件下输出功率及光光转换效率; (b) 输出功率为 502 W 时的光谱; (c)~(d) 输出功率分别为 502 W 和 468 W 时的时频域信号; (e) 泵浦功率为 952 W 时的光束质量因子及光斑形态

Fig.5 Output characteristic of fiber oscillator when pumped with 915 nm LD. (a) Output power and O-O efficiency under different pump power; (b) Optical spectrum at the output power of 502 W; (c)-(d) Time domain signals and their Fourier spectra at the output power of 502 W and 468 W, respectively; (e) Beam quality factor and beam profile when the pump power is 952 W

最后, 采用工业应用不多, 但有望提高模式不稳定阈值的 940 nm LD 作为该振荡器的泵浦源进行实验, 得到实验结果如图 6 所示。图 6(a) 为不同泵浦功率情况下输出功率及对应的光光转换效率。与 976 nm LD 和 915 nm LD 泵浦时类似, 在低功率时输出功率随泵浦功率成线性增长趋势, 但是当泵浦功率达到 1 144 W 之后, 输出功率出现下降, 对应的光光转化效率由最高时的 63% 下降到 59%。利用光谱仪测量得到的光谱数据如图 6(b) 所示, 光谱中没有明显的

拉曼成分, 故功率降低与光光转化效率下降与受激拉曼散射效应无关。利用光电探测器测量泵浦功率 1 144 W, 输出功率为 697 W 时的时域信号以及傅里叶变换后的频域信号如图 6(c) 所示。在输出功率为 697 W 时, 时域上没有观测到明显的波动, 频域也没有出现模式不稳定效应特征峰。图 6(d) 为泵浦功率 1 149 W, 输出功率 693 W 时的时频域信号, 结果显示, 在输出功率为 693 W 时, 时域上出现周期性的起伏, 频域上可以观察到明显的模式不稳定效应特征

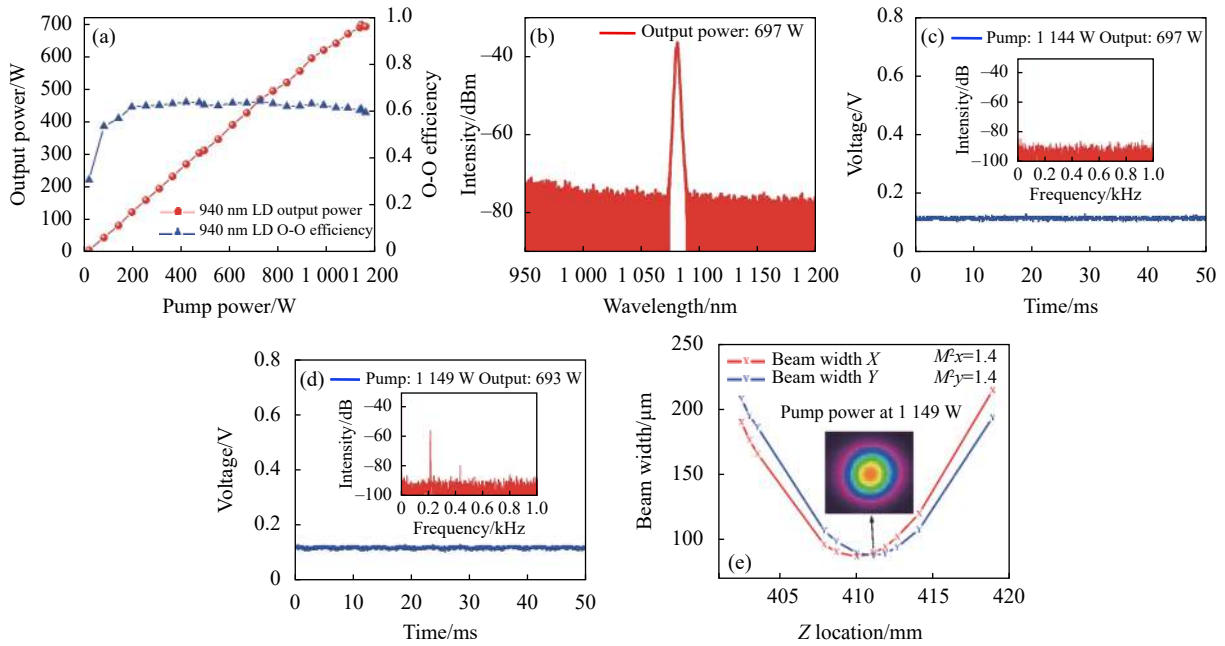


图 6 940 nm LD 泵浦时光纤激光振荡器输出特性。(a) 不同泵浦功率条件下输出功率及光光转换效率；(b) 输出功率为 697 W 时的光谱；(c)~(d) 输出功率分别为 697 W 和 693 W 时的时频域信号；(e) 泵浦功率为 1149 W 时的光束质量因子及光斑形态

Fig.6 Output characteristic of fiber oscillator when pumped with 940 nm LD. (a) Output power and O-O efficiency under different pump power; (b) Optical spectrum at the output power of 697 W; (c)-(d) Time domain signals and their Fourier spectra at the output power of 697 W and 693 W, respectively; (e) Beam quality factor and beam profile when the pump power is 1149 W

峰。在泵浦功率为 1149 W 时测得光斑形态如图 6(e) 所示, 对应的光束质量因子为  $M^2_x=1.4$ 、 $M^2_y=1.4$ 。根据实验中测得的功率和光光转化效率下降现象和时频域信号, 可以判定, 940 nm LD 作为泵浦源时, 该振荡器的模式不稳定阈值约为 697 W。

如表 1 所示, 分别利用 976、915、940 nm LD 泵浦

纤芯/包层直径为 30/400  $\mu\text{m}$  的掺镱光纤振荡器时, 激光器的模式不稳定阈值分别为 279、502、697 W, 光光转化效率分别为 67.7%、61% 和 63%, 且均能保持近单模光束质量。对比仿真结果可以看到, 泵浦吸收系数越高, 相同泵浦功率水平下增益光纤温度越高, 激光实际模式不稳定阈值越低, 理论与实验结果相吻合。

表 1 不同泵浦波长 TMI 阈值

Tab.1 TMI threshold for different pump wavelengths

Pump wavelength/nm	Pump absorption coefficient/ $\text{dB m}^{-1}$	Active fiber maximum temperature/ $^{\circ}\text{C}$	TMI threshold/W	O-O conversion efficiency
976	2.73	110.89	279	67.7%
915	0.88	70.93	502	61%
940	0.68	53.26	697	63%

## 4 结 论

实验结果表明, 泵浦吸收系数最低的 940 nm LD 具有最高的模式不稳定阈值, 泵浦吸收系数最高的 976 nm LD 模式不稳定阈值最低。分析主要原因有以下三点: 一是吸收系数较低的泵浦波长使得增益光纤温度梯度较低, 有利于抑制热致折射率光栅的形

成, 提高模式不稳定阈值; 二是吸收系数较低的泵浦波长对应较低的吸收截面, 使得激光器的上能级粒子数较低, 增加了空间烧孔效应, 提高了模式不稳定阈值<sup>[21]</sup>; 三是吸收系数较低的泵浦波长增强了增益饱和效应, 提高了模式不稳定阈值<sup>[22]</sup>。所以, 通过改变泵浦波长降低泵浦吸收系数可以有效提升模式不稳定阈值。

随着大模场光纤的使用,模式不稳定效应已经成为高功率光纤激光器功率提升的重要限制因素。在理论推导的基础上结合仿真设计实验,得出影响光纤激光器模式不稳定的热效应主要来自于泵浦吸收,而不是量子亏损。这一项新的研究表明,目前所广泛采用的 976 nm LD 可能不是实现高功率激光输出的理想泵浦源。下一步将根据实验结果,优化泵浦波长,兼顾量子效率和泵浦吸收系数,实现高模式不稳定阈值和光光转化效率,为实现 5~10 kW 高功率高光束质量光纤激光器提供新的泵浦源。

### 参考文献:

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives [Invited] [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63.
- [2] Zervas Michalis N, Codemard Christophe A. High power fiber lasers: A review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [3] Stutzki Fabian, Jansen Florian, Otto Hans-Jürgen, et al. Designing advanced very-large-mode-area fibers for power scaling of fiber-laser systems [J]. *Optica*, 2014, 1(4): 233.
- [4] Lingfa Zeng, Xi Xiaoming, Ye Yun. Near-single-mode 3 kW monolithic fiber oscillator based on a longitudinally spindle-shaped Yb-doped fiber [J]. *Optics Express*, 2020, 45(20): 5792-5795.
- [5] Xiaoming Xi, Peng Wang, Baolai Yang, et al. The output power of the all-fiber laser oscillator exceeds 7 kW [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0116001. (in Chinese)
- [6] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad[C]//Proc of SPIE, 2020, 11260: 1126022.
- [7] Ma Pengfei, Xiao Hu, Leng Jinyong, et al. Narrow linewidth fiber laser breaks through 4 kW near single mode output [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(1): 20200421. (in Chinese)
- [8] Ma Pengfei, Ma Yanxin, Su Rongtao, et al. Coherent synthesis of 8 kW fiber laser with high quality and high efficiency (brief news) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20200577. (in Chinese)
- [9] Christian Wirth, Thomas Schreiber, Mirosław Rekas, et al. High-power linear-polarized narrow linewidth photonic crystal fiber amplifier[C]//Proc of SPIE, 2010, 7580: 75801H.
- [10] Tao Rumao, Su Rongtao, Ma Pengfei, et al. Suppressing mode instabilities by optimizing the fiber coiling methods [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(2): 25101.
- [11] Ye Yun, Xi Xiaoming, Shi Chen, et al. Comparative study on transverse mode instability of fiber amplifiers based on long tapered fiber and conventional uniform fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(8): 85109.
- [12] Lin Aoxiang, Zhan Huan, Peng Kun, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(6): 180110. (in Chinese)
- [13] Wang Jianjun, Liu Yu, Li Min, et al. Ten-year review and prospect on mode instability research of fiber lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 121003. (in Chinese)
- [14] Xiaolin Wang, Pin Lv, Hanwei Zhang, et al. Fiber laser simulation software see fiber laser and fiber laser tool collection SFTool [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0506002. (in Chinese)
- [15] Smith A V, Smith J J. Steady-periodic method for modeling mode instability in fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2606-2623.
- [16] Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Yang Baolai, et al. High-power ytterbium-doped fiber laser oscillator current situation and future developments [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 401001. (in Chinese)
- [17] Yang Baolai, Zhang Hanwei, Wang Xiaolin, et al. Mitigating transverse mode instability in a single-end pumped all-fiber laser oscillator with a scaling power of up to 2 kW [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(10): 105803.
- [18] Li Xuewen, Yu Chunlei, Shen Hui, et al. Thermo-optic effect and mode instability threshold characteristics of high-power fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1001001. (in Chinese)
- [19] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [20] Haarlammert Nicoletta, de Vries Oliver, Liem Andreas, et al. Build up and decay of mode instability in a high power fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13274-13283.
- [21] Tao R, Ma P, Wang X, et al. Mitigating of modal instabilities in linearly-polarized fiber amplifiers by shifting pump wavelength [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(4): 45504.
- [22] Tao R, Wang X, Zhou P. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-19.