

·封面文章·

高功率光纤激光热光效应及模式不稳定阈值特性研究

李学文^{1,2}, 于春雷², 沈辉¹, 柏刚^{1,2}, 邹星星¹, 尤阳^{1,2}, 全昭¹, 李秋瑞¹,
漆云凤^{1,2,*}, 何兵^{1,2}, 周军^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 针对高功率强抽运条件下,热光效应及其引起的模式不稳定效应对高功率大模场光纤功率及亮度提升的限制,理论仿真了有源光纤吸收系数变化对光纤热沉积、热致折射率以及光纤数值孔径的影响,分析表明高吸收系数光纤带来更高热负荷密度,在热光效应调制下加剧光纤数值孔径的增大程度,从而降低光纤激光的模式不稳定阈值。在理论研究基础上设计并制备了两款不同抽运吸收系数光纤样品并展开了高功率模式不稳定实验研究。实验结果证明,吸收系数为 1.71 dB/m 的光纤样品的模式不稳定阈值激光功率约为 800 W,吸收系数为 1.20 dB/m 的光纤样品在输出激光功率达到 1700 W 时仍未观测到任何模式的不稳定现象,实验结果验证了降低光纤的抽运吸收系数可提升热致模式不稳定阈值的理论分析。该研究结果为设计研制大模场有源光纤,并获得更高功率光纤激光输出提供了一种新颖有效的技术途径。

关键词 光纤激光器;增益光纤;模式不稳定;抽运吸收系数;热光效应

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1001001

Thermo-Optic Effect and Mode Instability Threshold Characteristics of High-Power Fiber Laser

Li Xuewen^{1,2}, Yu Chunlei², Shen Hui¹, Bai Gang^{1,2}, Zou Xingxing¹,

You Yang^{1,2}, Quan Zhao¹, Li Qiurui¹, Qi Yunfeng^{1,2,*}, He Bing^{1,2}, Zhou Jun^{1,2}

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To study the limits of improvements of the high-power large-field fiber power and brightness caused by the thermo-optic effect and thermal-induced mode instability under strong pumping conditions, we analyze the influence of the variation of absorption coefficient on the thermal deposition, thermal-induced refractive index, and numerical aperture of a fiber. Results show that a fiber with high absorption coefficient causes a high heat load density, and its numerical aperture increases under the thermal-optic effect modulation, thereby reducing the mode instability threshold. Based on the theoretical research, fibers with two different pump absorption coefficients are designed and fabricated, and high-power mode instability experiments are performed. Experimental results show that the mode instability threshold power is 800 W for the high pump absorption fiber with an absorption coefficient of 1.71 dB/m. However, for the fiber with a low pump absorption coefficient of 1.20 dB/m, the mode instability is not observed when the output power reaches 1700 W. Thus, the mode instability threshold can be considerably improved by decreasing the pump absorption coefficient of the active fiber. These results are significant to the development of high-power active optical fibers and provide a novel and effective technical approach for obtaining high-power fiber laser output.

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-05-06; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61735007,61405202, 61705243)、上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200)、上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800)、上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200)

* E-mail: dreamer_7@siom.ac.cn

Key words fiber lasers; gain fiber; mode instability; pump absorption coefficient; thermo-optic effect

OCIS codes 140.3510; 060.2320; 140.6810; 120.6810; 190.4370

1 引 言

高功率光纤激光具有光束质量好、效率高、结构紧凑、柔软性操作等突出优点,广泛应用于工业加工、国防、科研等领域^[1-2],是目前激光技术领域中最为活跃的研究方向之一。近年来,随着高亮度半导体激光抽运技术的飞速发展以及双包层光纤技术的不断成熟,光纤激光器的输出功率呈现出指数增长的趋势^[3-6]。增大纤芯直径能够提高非线性效应和光纤端面损伤阈值,是提升光纤激光输出功率的主流途径^[7-8]。但增大纤芯直径将导致纤芯中传输的本征模式数量增加,在高功率强抽运条件下,受热光效应调制加剧了横模之间的模间耦合,从而引起了模式不稳定效应,这一现象成为引起高功率光纤激光光束质量急剧恶化并限制功率进一步提升的首要问题,是当前高功率光纤激光发展中亟待解决的技术难题。

高功率窄线宽光纤激光器具有时间相干性好、强度和相位噪声低等特点,在引力波探测、激光捕获中性原子、非线性频率转换、高亮度相干/光谱合成等领域具有重要应用^[9-13],是高功率光纤激光技术的热点研究分支。由于模式不稳定阈值与信号光线宽正相关,高功率窄线宽激光器中的热致模式不稳定阈值功率远低于宽谱光纤激光器^[14],因此对于窄线宽光纤激光中的热光效应及其热致模式不稳定阈

值影响机理的研究则更为迫切。

本文首先模拟了高功率强抽运下光纤抽运吸收系数变化对光纤热沉积的影响,分析了热光效应引起的光纤折射率变化对光纤数值孔径的影响,结合热致模式不稳定效应的物理机理进行仿真,分析表明较低抽运吸收系数有源光纤激光系统具有较低的温度梯度,从而可获得较高的模式不稳定阈值。在理论研究基础上设计并制备了两款具有不同抽运吸收系数的大模场双包层有源光纤样品,并开展了高功率窄线宽光纤放大及热致模式不稳定效应的实验研究,对比研究了两款光纤样品模式不稳定效应的阈值功率和物理特征,实验结果与理论吻合,为进一步提升模式不稳定阈值提供了有效的参考。

2 理论分析

2.1 双包层光纤激光热分析

研究双包层光纤激光器的热效应首先要确定光纤内的热沉积分布,在理想情况下,抽运光子与激光光子之间的能量亏损是激光介质内的主要发热因素,此时光纤介质内的热沉积分布与抽运光分布是基本一致的。因此,如果确定了光纤内吸收的抽运功率的分布就能够得出其中的热沉积分布。本研究利用求解速率方程的方法来求解抽运功率分布,再进一步分析光纤温度梯度分布。

首先,掺镱双包层光纤激光器稳态速率方程组为

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_a(\lambda_p)\Gamma_p/(h\nu_p A) + [P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_a(\lambda_s)\Gamma_s/(h\nu_s A)}{[P_p^+(z) + P_p^-(z)][\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_e(\lambda_p)]\Gamma_p/(h\nu_p A) + \frac{1}{\tau} + [P_s^+(z) + P_s^-(z)][\sigma_a(\lambda_s) + \sigma_e(\lambda_s)]\Gamma_s/(h\nu_s A)}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_s P_s^\pm(z) \{ [\sigma_a(\lambda_s) + \sigma_e(\lambda_s)] N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s) N(z) \} + \Gamma_s \sigma_e(\lambda_s) N_2(z) P_s(\lambda_s) - \alpha_s(z) P_s^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p P_p^\pm(z) \{ \sigma_a(\lambda_p) N - [\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_e(\lambda_p)] N_2(z) \} - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (3)$$

式中: N 为掺杂纤芯中镱粒子数密度; N_2 为激光上能级粒子数密度; z 为轴向距离; τ 为上能级自发辐射寿命; ν_p, λ_p 以及 ν_s, λ_s 分别为抽运光的频率和波长以及激光的频率和波长; A 为纤芯面积; α_p, α_s 分

别为抽运光和激光的损耗系数; $\sigma_e(\lambda_p), \sigma_a(\lambda_p)$ 和 $\sigma_e(\lambda_s), \sigma_a(\lambda_s)$ 分别是抽运光的受激发射截面和吸收截面及激光的受激发射截面和吸收截面; Γ_p, Γ_s 分别是抽运光和激光与纤芯的交叠因子; h 为普朗克

常数; $P_p^+(z)$ 、 $P_p^-(z)$ 分别表示沿 z 轴正向、反向传输的抽运功率; $P_s^+(z)$ 、 $P_s^-(z)$ 分别表示沿 z 轴正向、反向传输的激光功率。

由于光纤激光器抽运光的吸收过程绝大部分都发生在纤芯里,因此光功率转化为热量的过程主要发生在光纤的纤芯里。因此光纤热效应与光纤长度内所吸收的抽运光功率息息相关,光纤中抽运光吸收功率可表示为

$$\Delta P_{\text{abs}} = P_p(z) - P_p(z + dz) = \frac{dP_p(z)}{dz} \cdot \Delta z, \quad (4)$$

$$\Delta Q(r, z) = (1 - \eta) \Delta P_{\text{abs}}, \quad (5)$$

因此,得到光纤热源分布为

$$Q(r, z) \approx Q(z) = \frac{\alpha(z) P_p(z)}{\pi a^2} (1 - \eta), \quad (6)$$

式中: ΔP_{abs} 为光纤中抽运光吸收功率; $P_p(z)$ 为光纤 z 处的抽运光功率; $\Delta Q(r, z)$ 为抽运光吸收功率导致的热功率密度; r 为光纤径向的变量; a 为光纤纤芯半径; α 为吸收系数; $Q(z)$ 即为沿光纤轴向的热功率密度; η 为量子效率。

以圆形内包层来分析和建立模型,对双包层光纤的温度分布进行分析。在双包层光纤激光器达到稳定激光输出后,其温度分布也将达到稳态分布,对应的温度分布应满足热传导方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r)}{\partial r} \right] = -\frac{Q}{\kappa}, \quad (7)$$

式中: T 为光纤内温度分布; Q 为光纤轴向的热功率密度; κ 为光纤材料热传导系数。

考虑边界条件影响的稳态热传导方程,可得考虑轴向变化的纤芯和包层中的温度分布为

$$T_1(r, z) = T_0 - \frac{Q(z)r^2}{4\kappa_1}, \quad 0 \leq r \leq a, \quad (8)$$

$$T_2(r, z) = T_0 - \frac{Q(z)a^2}{4\kappa_1} - \frac{Q(z)a^2}{2\kappa_2} \ln\left(\frac{r}{a}\right), \quad a \leq r \leq b, \quad (9)$$

$$T_3(r, z) = T_0 - \frac{Q(z)a^2}{4\kappa_1} - \frac{Q(z)a^2}{2\kappa_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) - \frac{Q(z)a^2}{2\kappa_3} \ln\left(\frac{r}{b}\right), \quad b \leq r \leq c, \quad (10)$$

式中: a 、 b 和 c 分别对应双包层光纤的掺杂纤芯、内包层和外包层半径; κ_1 、 κ_2 和 κ_3 则分别为纤芯、内包层和外包层的热传导系数; T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 分别为光纤中心、掺杂纤芯、内包层和外包层温度分布。

表 1 给出数值分析所需的参数,其中 P_0 为注

入光纤的信号光功率, h_1 为热对流交换系数。求解上述方程并进一步得到不同抽运吸收系数 α_p ($0.005 \text{ m}^{-1}/0.05 \text{ m}^{-1}$) 对应的光纤热沉积 $Q(z)$ 分布和光纤温度分布变化,如图 1 所示。

表 1 求解双包层光纤激光器速率方程及热分布所需参数
Table 1 Parameters of double-clad fiber laser rate equation solution and heat distribution

Parameter	Value	Parameter	Value
λ_p/nm	976	Γ_p	0.01
λ_s/nm	1060	Γ_s	0.82
$\sigma_a(\lambda_p)/\text{m}^2$	6×10^{-25}	L/m	10
$\sigma_e(\lambda_p)/\text{m}^2$	2.5×10^{-27}	P_0/W	15
$\sigma_a(\lambda_s)/\text{m}^2$	1.4×10^{-27}	$P_p(0)/\text{W}$	1000
$\sigma_e(\lambda_s)/\text{m}^2$	2×10^{-25}	N/m^{-3}	6×10^{25}
α_p/m^{-1}	0.005, 0.05	α_s	0.006
$\kappa_1, \kappa_2/$ [W·(mK) ⁻¹]	1.38	$\kappa_3/$ [W·(mK) ⁻¹]	0.2
$a/\mu\text{m}$	12.5	$b/\mu\text{m}$	200
$c/\mu\text{m}$	250	$h_1/[\text{W} \cdot (\text{mK})^{-1}]$	100

图 1(a) 所示为不同吸收系数下光纤轴向热沉积分布差异对比,可见当抽运吸收系数从 0.005 m^{-1} 增长到 0.05 m^{-1} 时,轴向最大热负荷密度随之增加了约 $0.5 \times 10^{10} \text{ W/m}^3$,即更大的抽运吸收系数加剧了光纤内热转换,热沉积密度随之增加。热沉积密度变化对光纤内温度梯度分布的调制如图 1(b) 所示,从光纤内轴向、径向温度梯度分布来看,抽运吸收系数从 0.005 m^{-1} 增长到 0.05 m^{-1} 时,光纤内最高温度点处的温度上升了 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,光纤内温度梯度也从温度差最高 $115 \text{ }^\circ\text{C}$ 增长到了 $135 \text{ }^\circ\text{C}$,抽运吸收系数的增加加剧了光纤内温度梯度的形成。此处取吸收系数为 0.005 m^{-1} 和 0.05 m^{-1} ,在较为理想条件下定性分析抽运吸收系数变化对光纤热分布的影响,后续将优化理论模型,加入激光材料的热传导率的温度依赖性^[15]、严格温度边界条件、放大过程中的自发放大辐射等条件进行精确定量分析。

2.2 双包层光纤激光热光效应分析

文献[16]在对模式不稳定进行三维建模分析中,考虑增益介质中信号场的放大和热致折射率的变化时给出非线性折射率的表达式,即

$$n = n_m + \frac{dn}{dT} T(x, y) + i \frac{c_0}{4\pi\nu_s} \epsilon(x, y), \quad (11)$$

式中: n_m 为光纤初始折射率; $\frac{dn}{dT}$ 热光系数; c_0 为光速; ν_s 为信号光频率; $\epsilon(x, y)$ 是与掺杂分布和能级粒子反转的相关函数,其中考虑了增益介质中信号场的放大对折射率的影响。

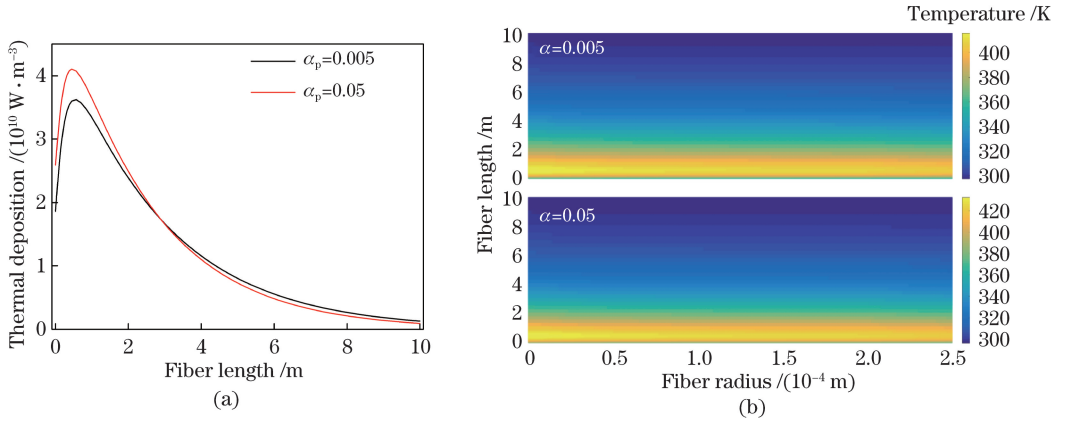


图 1 不同吸收系数光纤热沉积与温度分布对比图。(a)不同吸收系数光纤引起的热沉积分布变化图；(b)不同吸收系数光纤温度梯度分布变化图

Fig. 1 Comparison of thermal deposition and temperature distribution of fibers with different absorption coefficients. (a) Variation of thermal deposition distribution caused by fibers with different absorption coefficients; (b) variation of temperature gradient distribution of fibers with different absorption coefficients

只考虑与光纤温度梯度相关的热致折射率变化项

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T, \quad (12)$$

结合温度梯度分布仿真结果,发现不同吸收系数光纤在高功率光纤激光中引起的热致折射率变化不同,如图 2(a)所示。在光纤抽运吸收系数从 0.005 m^{-1} 增长到 0.05 m^{-1} 时,光纤纤芯热致折射率增加量也从最高 14×10^{-4} 增加到最高 18×10^{-4} , 反映在光纤数值孔径 $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} [\Delta = (n_1 - n_2)/n_1]$ 上时, NA 的增幅约为

0.006。目前常规大模场增益光纤的数值孔径范围约为 0.065 ± 0.005 , 数字孔径变化量达到 0.006 时将严重影响光纤纤芯支持模式的变化。模式不稳定阈值功率随光纤纤芯数值孔径的增加而降低的实验研究和理论分析已有多例研究报道^[17-19], 其规律曲线如图 2(b)所示^[19], 图中 20/400 是指光纤纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$, 外包层直径为 $400 \mu\text{m}$, 下同。综上,降低光纤抽运光吸收系数可以减小热光效应对光纤纤芯的数值孔径的调制效应,进而有效控制纤芯中的模式,实现少模甚至单模传输,这是一种提高热致模式不稳定阈值功率的有效途径。

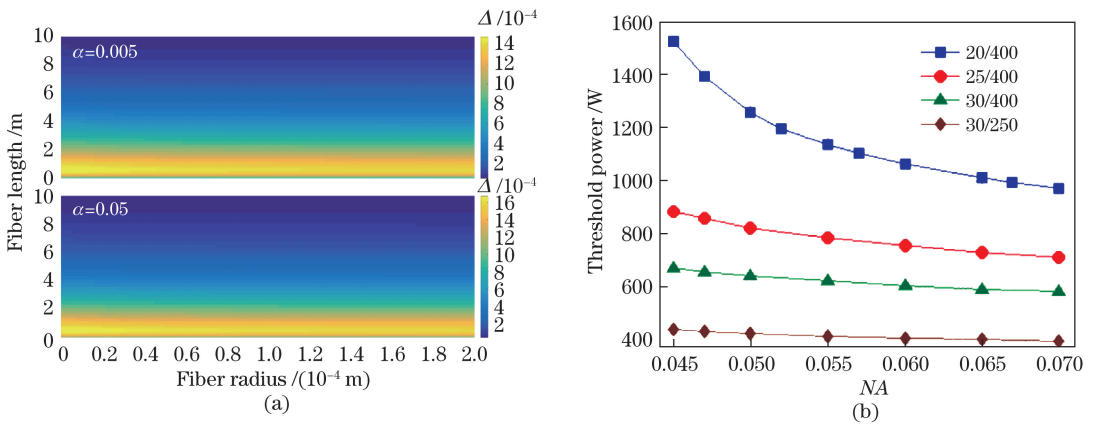


图 2 不同吸收系数光纤折射率分布对比与纤芯数值孔径对模式不稳定阈值的影响。

(a)不同吸收系数光纤对热致折射率变化的影响;(b)纤芯 NA 对模式不稳定阈值影响^[19]

Fig. 2 Comparison of refractive index distribution of fibers with different absorption coefficients and effect of fiber core numerical aperture on mode instability threshold. (a) Effect of absorption coefficient on thermal-induced refractive index; (b) effect of NA of fiber core on mode instability threshold^[19]

3 实验装置

为了验证理论分析中得出的降低光纤抽运光吸收系数可提高热致模式不稳定的阈值功率的结论,

搭建了基于正向抽运主振荡功率放大器(MOPA)结构的多级级联高功率全光纤放大器实验平台,结构如图3所示。

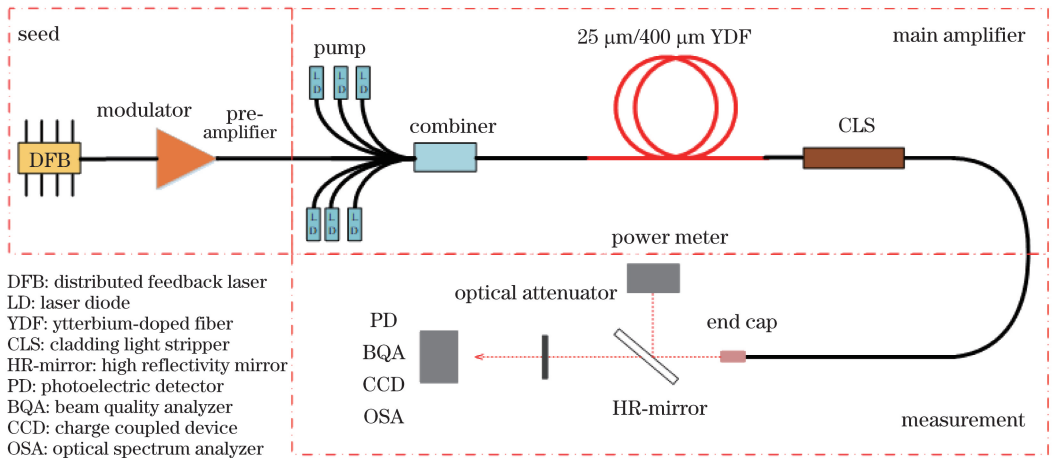


图3 全光纤高功率窄线宽光纤激光放大器结构图

Fig. 3 Structural diagram of all-fiber high-power fiber laser amplifier with narrow linewidth

种子源采用中心波长为 1060 nm 的分布式反馈激光器 (DFB), 经过预放大级输出激光功率为 15 W、激光线宽约为 25 GHz 的激光, 经隔离器后作为主放大级的信号光注入。6 组多模半导体激光抽运阵列经由抽运-信号合束器合束为主放大级以提供抽运光, 抽运源采用 976 nm 波长锁定激光二极管 (LD), 单组提供的抽运光功率最大约为 400 W, 总抽运功率约为 2400 W。主放大级的增益光纤选取双包层大模场光纤, 用于对比验证实验的两款不同吸收系数光纤的具体参数由表 2 给出, 两款增益光纤除吸收系数不同之外其余参数基本一致。利用熔接在增益光纤之后的包层光滤除器 (CLS) 将光纤中的残余抽运光和包层激光剥除。包层光滤除器的剥除比例达 20 dB, 以保证输出激光的光谱纯度和高光束质量。

镜片的低功率部分则进入探测系统中, 用于不同激光特性的测量。探测系统包括高速光电探测器 (PD)、光束质量分析仪 (BQA) 和光斑分析相机 (CCD)。光谱分析仪用于对输出激光的信噪比进行实时监控; 带宽为 150 MHz 铟镓砷光电探测器可以收集透射光并进行光电信号转换, 可通过示波器、频谱分析仪等对输出激光功率的时域特性和频域特性进行测试分析; 采用光束质量分析仪对透射激光进行收集分析, 得到热致模式不稳定发生前后激光光束质量变化情况; 利用光斑分析相机采集光斑数据用于分析热致模式不稳定发生后引起的激光模式畸变特性。

表 2 对比实验的两款自研大模场光纤参数表

Table 2 Parameters of two self-made large-mode-field fibers in contrastive experiments

Parameter	Fiber A	Fiber B
Core/cladding diameter / μm	25/400	25/400
Numerical aperture	0.065	0.065
Thermo-optic coefficient / (10^{-5} K^{-1})	1.2	1.2
Thermal conductivity / $[\text{W} \cdot (\text{mK})^{-1}]$	1.38	1.38
Absorption coefficient α / $(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	1.71	1.20

放大后的激光通过熔接端帽后准直输出, 输出激光再经过高反镜分成两束, 反射光部分入射到 5 kW 激光率计, 用于测量记录主放大激光放大总功率, 透射过

此外, 上述主放大级的有源光纤均盘绕在弯曲半径一致的金属水冷板上, 通过水冷机精确控制冷却水温度为 $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$, 从而获得良好的热交换, 并尽可能保证两款光纤对比实验的工作条件一致。

4 实验结果与分析

基于上述高功率全光纤窄线宽光纤激光放大器实验平台, 对两款不同吸收系数的自研光纤进行高功率下的热致模式不稳定阈值特性差异对比实验。下面将分别从时域特性、频域特性、光斑与光束质量特性等与模式不稳定阈值相关的物理表征方面详述两款光纤的实验结果。

4.1 高吸收系数光纤 A 实验研究

1) 时域特性研究

为了研究热致模式不稳定的时域特性, 在高反

镜透射光处采样,利用多模跳线采集光斑的局部区域信号并将其传输到光电探测器。模式稳定时,光电探测器电压信号基本保持不变,发生轻微变化可能是因实验室水冷机、平台振动所致,如图 4(a)所示的功率为 200 W、500 W 情况;当模式不稳定时,

光电探测器信号则会发生毫秒尺度的快速周期变化,图 4 表明随着功率提升,周期性波形越来越明显,在输出 1300 W 时呈现出显著的正弦周期波形,周期约为 1 ms,即 1 kHz,符合文献[20]中描述的热致模式不稳定现象出现时的时域特性。

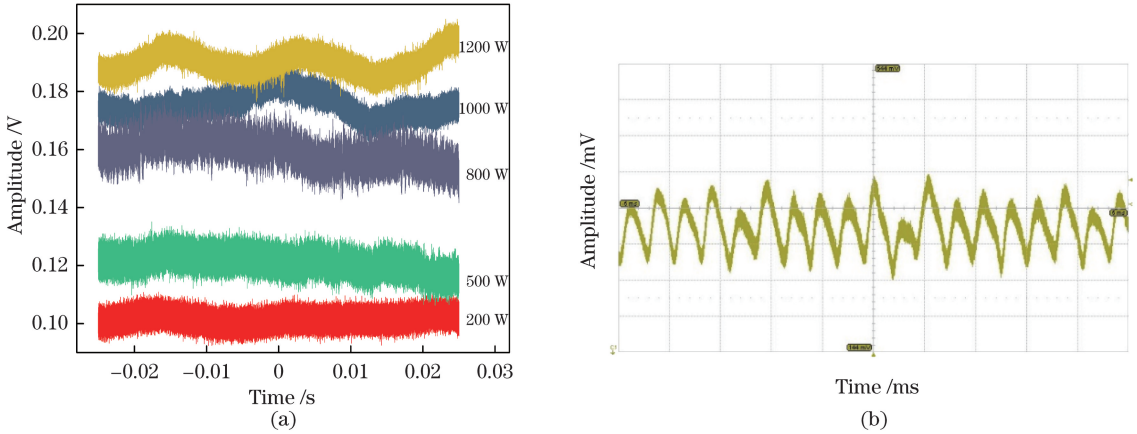


图 4 不同输出激光功率对应时域信号图。(a) 200~1200 W 数据图;(b) 1300 W 示波器图

Fig. 4 Time domain signal diagrams at different output laser powers. (a) Data map within 200-1200 W; (b) scope chart at 1300 W

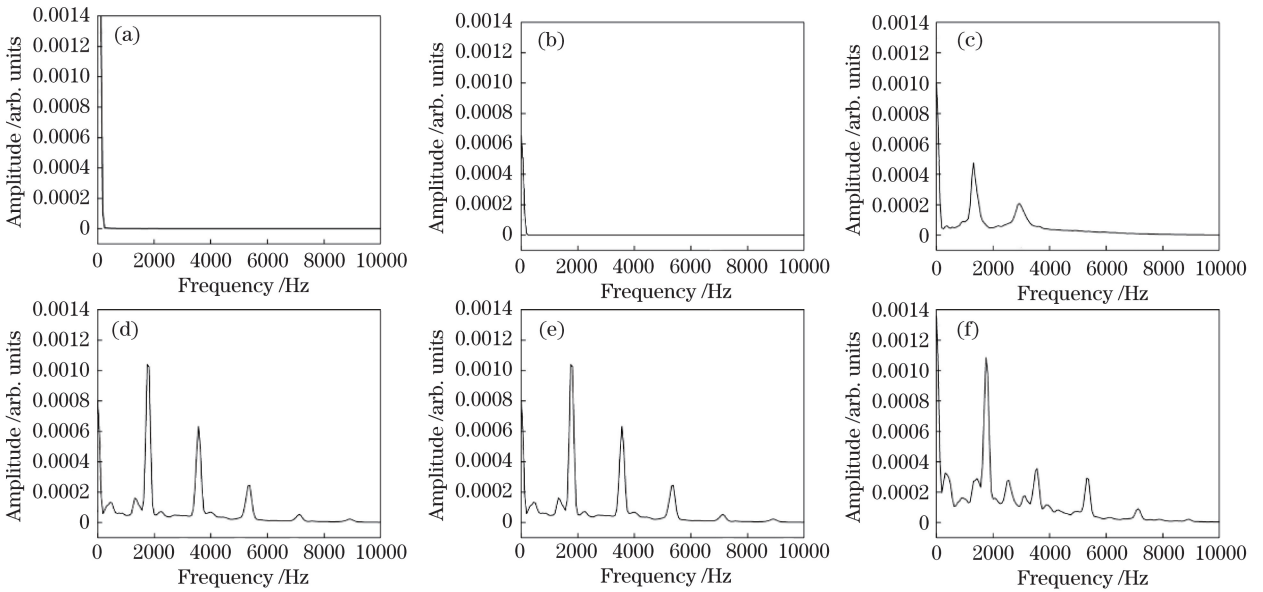


图 5 不同输出激光功率对应频域信号图。(a) 10 W;(b) 100 W;(c) 800 W;(d)1000 W;(e) 1200 W;(f) 1300 W

Fig. 5 Frequency domain signal diagrams at different output laser powers.

(a) 10 W; (b) 100 W; (c) 800 W; (d) 1000 W; (e) 1200 W; (f) 1300 W

2) 频域特性研究

在对时域特性分析的基础上,利用频谱仪对局部光斑的功率噪声进行频谱分析。实验结果如图 5 所示,可以根据频谱信号看出放大器的频域特性随着激光功率的提升大致分为 3 种状态。低功率下模式稳定时,频谱信号分布基本保持不变,偶尔有噪声引进导致极少数起伏波峰出现,如图 10 W、100 W

所示状态。随着功率不断上升,频谱分析信号分布则发生变化。当功率为 800 W 时,在频率 1500 Hz、2500 Hz 附近出现了具有一定带宽的强度较小的频率尖峰,当功率上升到 1000 W、1200 W 时,频率尖峰从 1500 Hz 开始每隔 2000 Hz 朝高频方向周期性出现尖峰,且强度递减,这与模式不稳定发生后的频谱频率峰周期性分布现象一致;随着功率继续提升,

周期间隔之间的尖峰也会增多,当抽运功率增加到约 1300 W 时,频率分布峰失去周期性,呈现出类似噪声的分布,可以断定,如果继续提升功率,频谱分布则会彻底演变为类似噪声基底状态。依据文献 [20] 所报道的模式不稳定阈值频域特性,判断本实验的热致模式不稳定效应出现时的激光功率约为 800 W。

3) 光斑与光束质量特性研究

为了验证热致模式不稳定发生后对光纤激光光束质量的影响,实验分别利用光斑分析相机和光束质量分析仪对不同激光功率下的光斑形态和光束质量因子(M^2)进行测量,实验结果如图 6 所示,其中 M_x^2 、 M_y^2 分别是光斑横轴、纵轴两个方向对应的分量。对于不同功率下的光斑形态,虽然相机的分辨率不足以观察模式不稳定千赫兹级别毫秒量级的变化,但在模式不稳定发生后,依然可以在相机中观测

到光斑明显分瓣变形的情况。如图 6(a) 所示,400 W、700 W 功率下的光斑形态稳定,较好地保持了基模圆形光斑的形态;当功率达到 800 W 时,虽然光斑大体仍保持圆形形态,但隐约能看出光斑边缘有分瓣趋势,可能受限于相机分辨率,未能很好地捕捉光斑动态变化;而 900 W 功率下的光斑则分瓣明显,呈现心形,很好地证明了热致模式不稳定引起高阶模的产生影响了激光输出光斑形态这一结论。光束质量分析仪得到的 M^2 在功率低于 800 W 时, M^2 基本都保持在近衍射极限的 1.5 左右,而在 800 W 时, M^2 则陡增到 2.0,进一步证明了在热致模式不稳定发生后,输出激光中的高阶模成分不断增加,导致光束质量不断退化。对于光斑形态和光束质量的分析也进一步验证了吸收系数高的增益光纤 A 在高功率放大下模式不稳定出现的激光功率约为 800 W。

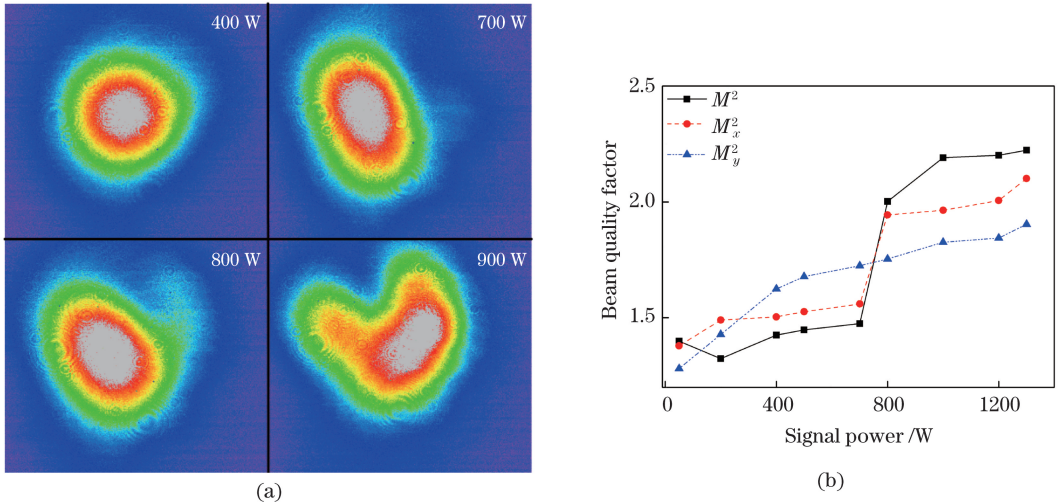


图 6 输出激光的光斑与光束质量特性。(a) 光斑图样随激光功率变化图;(b) 光束质量因子随激光功率变化图
Fig. 6 Characteristics of pattern and beam quality of output laser. (a) Patterns of beams at different laser powers; (b) variation in beam quality factor with laser power

根据上述对模式不稳定出现时的时域特性、频域特性和光束质量特性分析,本研究以观测到模式不稳定出现时的激光功率为模式不稳定阈值功率,于是对于高吸收系数光纤样品 A,其模式不稳定阈值激光功率约为 800 W。

4.2 低吸收系数光纤 B 实验研究

对于低吸收系数光纤 B,以观测模式不稳定出现时的时域特性、频域特性和光束质量特性分析来确定模式不稳定的阈值激光功率。时域、频域观测实验结果如图 7 所示,无论是从图 7(a)的时域信号分布随功率增长变化图,还是从图 7(b)的频域信号分布变化图来看,直到 1700 W 激光输出都未明显

观测到 4.1 节所述的周期性起伏和等间距尖峰,即未发生与热致模式不稳定发生后的时域、频域物理表征相吻合的现象,由此可以断定对于低吸收系数增益纤 B 的高功率实验,激光功率 1700 W 并未达到热致模式不稳定激光阈值功率。此外需要注意的是,当激光功率为 1700 W 时,时域信号图中出现两个类似周期起伏的波峰,这两个波峰是由激光功率抖动所造成的,不具有周期性;频域图中低频段约 300 Hz 附近的尖峰是在激光功率为数十瓦时开始出现的,并一直存在,当放大到 1700 W 时,尖峰幅度略微增大,这可能是由主放大器功率噪声和测试过程中的振动引起的。

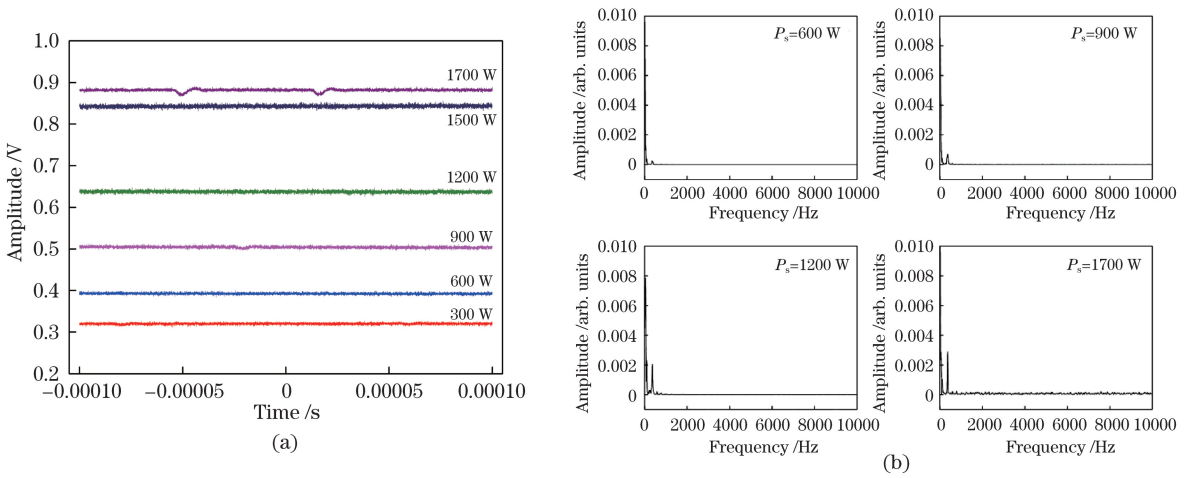


图 7 光纤 B 对应的不同激光功率下的时域和频域信号分布测试结果图。

(a)不同输出激光功率对应时域信号分布图;(b)不同输出激光功率对应频域信号分布图

Fig. 7 Time domain and frequency domain signal distribution test results of fiber B under different laser powers. (a) Time domain signal distributions at different output laser powers; (b) frequency domain signal distributions at different output laser powers

图 8 显示了输出信号光功率与抽运光功率关系图及光斑图样随激光功率增长的变化图。可以看出激光功率与抽运光功率依然保持极好的线性增长趋势,受限于抽运光功率不足,最大输出激光功率为 1700 W。光斑形态从低功率到最大输出功率都较好地保持基模圆形光斑,未观测到任何模式不稳定发生

时的光斑形态波动。光束质量因子随激光功率变化图也印证了激光器中没有发生模式不稳定引起的光束质量下降现象, M^2 一直保持在 1.2~1.3。因此,对于低吸系数增益光纤 B 的高功率实验,激光功率为 1700 W 时并未观测到任何模式不稳定现象,即模式不稳定阈值激光功率高于 1700 W。

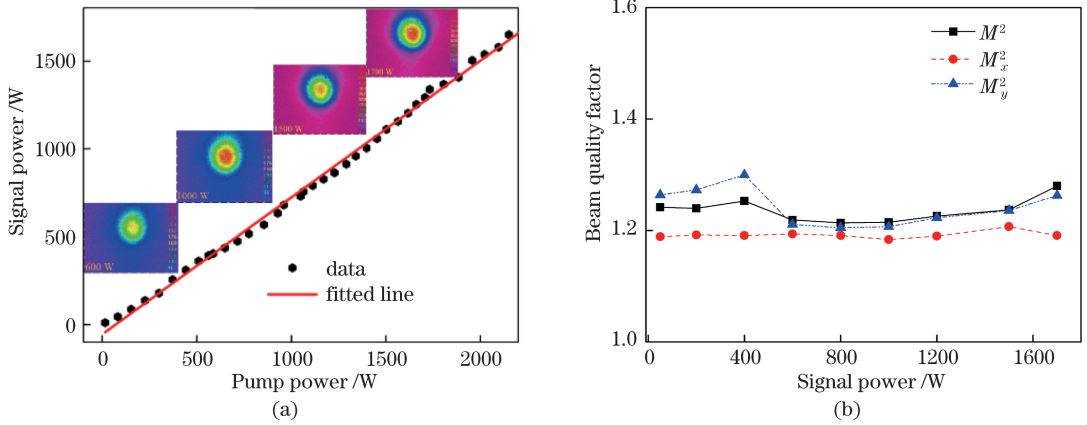


图 8 光纤 B 输出激光光斑与光束质量特性随激光功率变化情况。(a)输出信号光功率与抽运光功率关系及光斑图样随激光功率变化图;(b)光束质量因子随激光功率变化图

Fig. 8 Laser spot and beam quality characteristics of fiber B vary with output laser power. (a) Relationship between output laser power and pump power and variation in spot pattern with laser power; (b) variation in beam quality factor with laser power

综上,两款不同抽运吸收系数有源光纤的高功率模式不稳定特性对比验证实验结果表明,相同条件下,抽运吸收系数为 1.71 dB/m 的光纤样品 A 的模式不稳定阈值激光功率约为 800 W,吸收系数为 1.20 dB/m 的光纤样品 B 的模式不稳定阈值激光功率则超过 1700 W,验证了理论分析提出的通过降低抽运吸收系数来提高模式不稳定阈值方案的可行性。

5 结 论

理论仿真了高功率光纤激光器中不同吸收系数增益光纤的热沉积分布、热致折射率变化的差异,分析表明较高吸收系数光纤热沉积更为严重,会加剧温度梯度的形成并增大热致折射率变化量,导致光纤纤芯数值孔径增加,进而降低光纤模式不稳定阈

值。设计并制备了两款抽运吸收系数不同的 $25\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 增益光纤, 基于同一高功率全光纤窄线宽光纤激光放大器实验平台, 在对两款光纤样品的热致模式不稳定阈值特性进行了实验研究, 比较了不同抽运吸收系数对热致模式不稳定激光阈值功率的影响。结果表明, 相同实验条件下高抽运吸收系数光纤样品在 $800\ \text{W}$ 激光时即出现明显的热致模式不稳定现象, 而低抽运吸收系数光纤样品的模式不稳定阈值功率则高于 $1700\ \text{W}$ 。实验验证有效支撑了通过降低光纤抽运光吸收系数减小热光效应可提升热致模式不稳定阈值功率的理论分析, 对研制大模场光纤用于进一步提升高功率光纤激光输出功率提供了一种新颖有效的途径。

参 考 文 献

- [1] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, *et al.* The renaissance and bright future of fibre lasers [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2005, 38(9): S681-S693.
- [2] Wang Y B, Li J Y. Status and development tendency of high power ytterbium doped fibers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201009.
王一礪, 李进延. 高功率掺镱光纤的现状与发展趋势 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201009.
- [3] Limpert J, Roser F, Klingebiel S, *et al.* The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 537-545.
- [4] Zha C W, Li T L, Sun Y H, *et al.* 3.5 kW narrow linewidth all-fiber laser amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0515001.
查从文, 李腾龙, 孙殷宏, 等. 3.5 kW 窄线宽全光纤激光放大器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0515001.
- [5] He B, Zhou J, Lou Q H, *et al.* 1.75-kilowatt continuous-wave output fiber laser using homemade ytterbium-doped large-core fiber [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, 52(7): 1668-1671.
- [6] Xu J M, Xiao H, Leng J Y, *et al.* Random fiber laser with the same pump power amplification to achieve 3 kW near diffraction limit output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0815001.
许将明, 肖虎, 冷进勇, 等. 随机光纤激光同带抽运功率放大实现 3 kW 近衍射极限输出 [J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0815001.
- [7] Zenteno L. High-power double-clad fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(9): 1435-1446.
- [8] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, *et al.* Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [9] Gapontsev V, Avdokhin A, Kadwani P, *et al.* SM green fiber laser operating in CW and QCW regimes and producing over 550 W of average output power [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8964: 896407.
- [10] Zhang L, Jiang H W, Cui S Z, *et al.* Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 889-895.
- [11] Ricciardi I, Tommasi E D, Maddaloni P, *et al.* A narrow-linewidth, frequency-stabilized OPO for sub-Doppler molecular spectroscopy around $3\ \mu\text{m}$ [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8434: 84341Z.
- [12] Augst S J, Goyal A K, Aggarwal R L, *et al.* Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5): 331-333.
- [13] Liu A P, Mead R, Vatter T, *et al.* Spectral beam combining of high-power fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5335: 81-89.
- [14] Kuznetsov M, Vershinin O, Tyrtshnyy V, *et al.* Low-threshold mode instability in Yb^{3+} -doped few-mode fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29714-29725.
- [15] Sato Y, Taira T. The studies of thermal conductivity in GdVO_4 , YVO_4 , and $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ measured by quasi-one-dimensional flash method [J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10528-10536.
- [16] Iakushev S, Steinke M, Kracht D, *et al.* Development of a comprehensive 3D model for transversal mode instability investigations [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10683: 1068337.
- [17] Beier F, Hupel C, Kuhn S, *et al.* Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14892-14899.
- [18] Peng K, Zhan H, Ni L, *et al.* Single-mode large-mode-area laser fiber with ultralow numerical aperture and high beam quality [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(35): 10133-10137.
- [19] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* Influence of core NA on thermal-induced mode instabilities in high power fiber amplifiers [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(8): 085101.
- [20] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* Experimental study on mode instabilities in all-fiberized high-power fiber amplifiers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(s2): s20603.