

高功率光纤激光中模式不稳定性现象研究进展

陶汝茂 周朴 肖虎 王小林* 司磊 刘泽金

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 模式不稳定性指高功率光纤激光随着输出功率提升发生的由稳态基模输出突然变为非稳态高阶模式输出的模式突变,会导致光束质量下降,限制着衍射极限光束质量光纤激光输出功率的提升。介绍了高功率光纤激光中模式不稳定性现象的产生机理以及相关的实验和理论研究,详细分析了模式不稳定性现象的一些性质,总结了解决或抑制高功率光纤激光中模式不稳定性现象的方法。最后,对高功率光纤激光模式不稳定性现象研究的未来发展趋势进行了初步探讨。

关键词 光纤光学;模式不稳定性;光纤放大器;量子亏损;热效应;折射率光栅

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.020001

Progress of Study on Mode Instability in High Power Fiber Amplifiers

Tao Rumao Zhou Pu Xiao Hu Wang Xiaolin Si Lei Liu Zejin

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

Abstract Mode instability (MI) is an abrupt mode change when the average output power increases above a certain threshold power, which results in degradation of beam quality and currently limits the power scaling of diffraction-limited high power fiber laser. The investigation progress on MI in high power fiber amplifiers is introduced in detail. The characteristics of MI are described and the ways to mitigate MI and increase the threshold power are summarized. The development trends of study on MI in high power fiber amplifier are briefly discussed.

Key words fiber optics; mode instability; fiber amplifier; quantum defect; thermal effect; refractive index grating

OCIS codes 060.2320; 060.4370; 140.6810; 140.4480

1 引言

由于光纤的特殊波导结构,光纤激光具有高亮度、高光束质量、热管理方便等优点。近年来,随着高亮度半导体抽运技术和双包层光纤制造工艺的快速发展,光纤激光技术迅猛发展,单纤单模输出功率已经迈进万瓦量级^[1-6]。然而,光纤的特殊波导结构使激光能量都被约束在微米级的光纤纤芯内,随着光纤激光功率的不断提升,纤芯内将形成极高的能量密度,引起各种有害的非线性效应,如受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)等。增大光纤纤芯尺寸、降低纤芯内的功率密度是避免非线性效应产生的有效方法之一^[7]。但是,增大光纤纤芯尺寸不可避免地会使光纤支持多个模式。如果增益光纤支持多个模式,则会产生另一种非线性效应——模式不稳定性:输出功率达到某个阈值功率(P_{th})后,光纤激光的输出模式由稳定的基模变为基模和高阶模相对成分随时间迅速随机变化的非稳态模式^[8]。模式不稳定性会导致激光光束质量急剧退化,严重限制光纤激光的应用,已经成为衍射极限光束质量大模场面积掺镱光纤激光功率提升的最大限制因素之一,近年来引起了研究人员的广泛关注^[7-37]。

自2010年德国耶拿大学的研究人员首次报道模式不稳定性现象以来^[10],各国研究人员开展了大量理论和

收稿日期: 2013-09-22; 收到修改稿日期: 2013-11-05; 网络出版日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(11274386)

作者简介: 陶汝茂(1987—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光方面的研究。E-mail: taorumao@sohu.com

导师简介: 刘泽金(1963—),男,博士,教授,主要从事高能激光和激光相干合成方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

实验研究,包括德国的耶拿大学和汉诺威激光中心,丹麦的丹麦科技大学,美国的密歇根大学、克莱姆森大学、美国空军实验室、Fibertek、Nufern、AS-Photonics公司等^[1]-37]。本文对高功率光纤激光中的模式不稳定现象研究进行了系统梳理:首先介绍了模式不稳定现象产生的机理,其次总结了相关的实验和理论研究结果,最后分析了模式不稳定现象的抑制方法。

2 模式不稳定现象及原因

图1给出了模式不稳定现象产生的典型实验结果^[9]:放大器的掺杂光纤为1.3 m长、纤芯直径63 μm (模场直径56 μm)、空气包层直径200 μm 的光子晶体光纤(PCF),采用976 nm的抽运源,将中心波长1040 nm、谱宽7 nm、重复频率40 MHz的脉冲种子激光从5 W放大到270 W。当输出功率270 W时,近场光斑为稳定的基模高斯光斑,如图1(a)所示;当输出功率为275 W时,近场光斑在基模(LP_{01})和高阶模(LP_{11})之间不断波动,出现模式不稳定现象,如图1(b)所示。

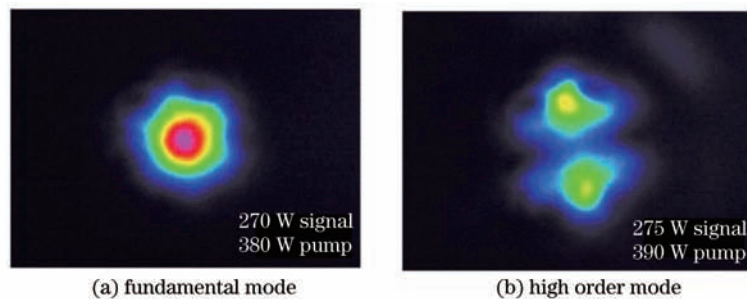


图1 模式不稳定现象出现前后的近场光斑

Fig.1 Near-field images before and after the onset of mode instability

目前,研究人员普遍认为模式不稳定现象出现的根源在于光纤中量子亏损引起的热效应^[7]:为了抑制SBS、SRS等非线性效应的产生,高功率光纤激光采用大模场面积掺杂光纤,而对于大模场面积光纤,光纤自身就支持多个模式,当信号光注入主放光纤时,虽然主要能量集中在基模(FM),但是不可避免地会激发少量的高阶模式(HOM),如图2(a)所示,基模和高阶模式相互干涉,在纤芯中形成周期性的光强分布,周期与

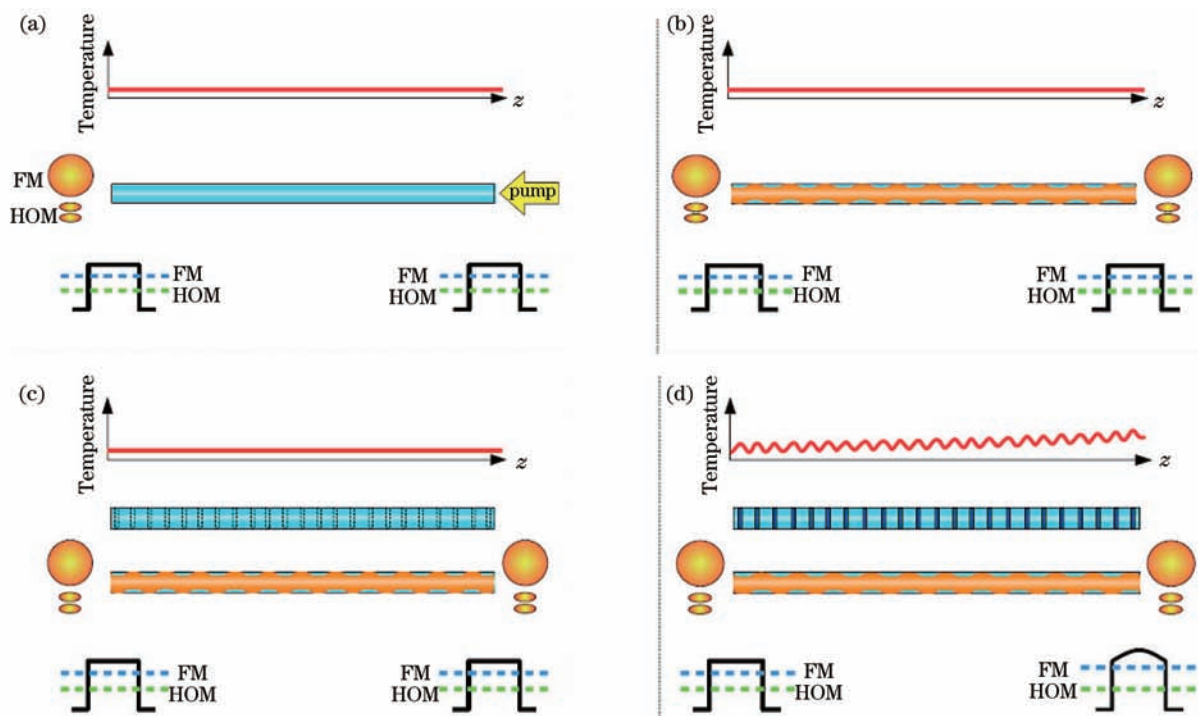


图2 模式不稳定现象基本原理

Fig.2 Principle of mode instability

两个模式的有效折射率差成反比,如图2(b)所示;当抽运光注入、信号光开始被放大后,纤芯掺杂区会形成周期性的抽运光提取,而量子亏损产热与抽运光吸收相关,因此会形成以周期性光强分布为主要特征的准周期性振荡的热负荷分布,如图2(c)所示;由于温度的上升不是瞬时的,热负荷产生一定的时间后,纤芯中才会形成周期性的温度分布,如图2(d)所示。由于热光效应,纤芯中周期性信号光分布和量子亏损引起的周期性温度分布最终会形成长周期折射率光栅,该光栅具有将能量在低阶模式和高阶模式之间耦合的能力,是高功率光纤激光中模式不稳定现象产生的根源。

3 模式不稳定现象的研究进展

3.1 实验研究

耶拿大学、丹麦科技大学、美国空军实验室等单位对空间耦合结构主振荡功率放大(MOPA)光纤激光器中的模式不稳定现象开展了大量实验研究。实验结果表明,高功率光纤激光中的模式不稳定现象有以下主要特点^[7]。

1) 模式不稳定现象具有“阈值性”^[8]:只有输出功率到达在某个阈值功率后,模式不稳定现象才出现,当输出功率降到阈值以下,模式不稳定现象消失,输出光的近场光斑变为稳定的高斯形态。

2) 模式不稳定现象具有“往复性”^[11-12]:模式不稳定现象出现后,能量从基模转移到高阶模,但并不是一直保持在高阶模,而是会在基模和高阶模式之间反复转移,往复转移发生在毫秒量级的时间尺度。

3) 模式不稳定现象的功率阈值具有“饱和性”和“漂白性”^[13]:当模式不稳定现象反复出现后,模式不稳定现象出现的阈值功率会不断下降,最终达到一个稳定值,不再下降,即“饱和性”;对达到饱和之后的光纤,利用消除光子暗化的漂白方法漂白后,阈值功率会上升,即“漂白性”,但无法达到初始水平,且随着模式不稳定现象出现次数的增加,阈值功率又会下降,并回到饱和值。

4) 模式不稳定现象与光纤的模场直径直接有关^[16]:通常,模场直径越大,模式不稳定现象出现的阈值功率越低,模式不稳定的往复能量转移发生得越快。

5) 模式不稳定现象在阈值附近具有“周期性”^[16]:在模式不稳定现象出现的阈值附近,模式不稳定现象的频谱中具有等间距的尖峰。

6) 模式不稳定现象具有毫秒量级的生长时间和生存时间^[17]:当输出功率超过模式不稳定阈值功率后,模式不稳定现象不会立即出现,而是在数毫秒之后出现;当主放抽运或种子突然关闭时,热致长周期折射率光栅会存续一段时间;生长时间随吸收抽运光增加而减小。

7) 随着输出功率的升高,模式不稳定现象频谱会展宽并失去周期性而趋于“混沌”^[16]。当输出功率超出模式不稳定功率阈值后,频谱会向高频方向展宽,输出光束的模式变化会趋于无规律,失去周期性,处于混沌状态。

8) 模式不稳定现象频谱具有“上限性”^[16]:模式不稳定现象引起起伏的频率分布存在频率上限,对于不同的光纤,频率上限的具体值不同;由于模式不稳定现象是由热效应引起,而热效应不是瞬时效应,受热扩散时间影响,频域特征必然存在上限。

9) 模式不稳定现象仅造成输出光束光束质量下降,不影响平均输出功率^[8]:当模式不稳定发生后,输出功率不会下降,而且还可以继续增加,只是输出光束的光束质量变差。

3.2 理论研究

关于模式不稳定现象的理论研究最早是从耶拿大学开始的耶拿大学的研究人员首次提出^[18]:两个横向空间模式的“拍”效应在光纤中形成干涉图样,由于热光效应或共振增强非线性效应形成长周期折射率光栅。此后不久,美国AS-Photonics公司的Smith等^[19]指出只有在折射率光栅与光场干涉分布存在相移的情况下,模式之间的能量转移才能发生,并指出模式不稳定性是由受激热瑞利散射(STRS)效应引起的。关于相移的产生,有两种解释。一种是Smith等^[20-21]提出的通过假设高阶模与基模之间有频移而导致光栅移动引起的相移:两个模式的频率之间有微小的差别($\omega_1 \neq \omega_2$),则干涉光场会沿着光纤移动,而由于热效应需要一定的时间,导致热致折射率光栅与干涉光场之间产生相移。他们等指出频移产生的原因有量子噪声、抽运调制等。另一种是耶拿大学提出的由非绝热波导改变引起的相移^[7]:光束无法使自身快速适应迅速变

化的波导条件,从而导致光束与折射率光栅不同相。

对于频移导致的移动光栅假设,Smith等^[20-21]、丹麦科技大学的Hansen等^[22-23]、美国克莱姆森大学的Dong^[24]以及美国密歇根大学的Hu等^[25]建立了纯数值模型、半解析或全解析数学模型,并对模式不稳定现象进行了研究,研究结果与实验现象能够一定地吻合;对于非绝热波导改变的准静态光栅假设,耶拿大学的Jauregui等^[26-27]、美国空军实验室的Ward等^[15,28-29]也建立了数值模型和解析模型,同样获得了与实验观察现象吻合较好的结果。可见,基于上述两种解释的理论模型都能部分描述实验中观察到的模式不稳定现象,但目前两个理论假设都无法推翻对方,还需要开展更多的实验研究。

4 模式不稳定现象的抑制方案

在理论研究和实验研究的基础上,研究人员提出了一些方法来抑制模式不稳定现象并提高模式不稳定现象出现的阈值功率。模式不稳定性的原因在于现有的大模场面积光纤本身支持多个模式,导致信号光注入时激发模式不纯,加上光纤激光器掺杂光纤中存在量子亏损产生热负荷,产生温度分布,最后经热光效应产生了长周期折射率光栅。因此,消除或抑制模式不稳定现象主要从消除长周期折射率光栅、设计新型光纤、减小量子亏损等方面入手,主要有以下几类方法。

4.1 消除或抑制热致长周期折射率光栅

模式不稳定现象是由热致长周期光栅引起,因此,消除长周期光栅或缩短光栅的长度,是抑制模式不稳定现象的有效方法。基于上述原理,耶拿大学的研究人员提出利用声光偏转器(AOD),通过主动控制高阶模式激发来削弱长周期光栅影响,提高模式不稳定现象出现的阈值功率,如图3所示^[12]。种子光经过声光偏转器后,经透镜耦合到主放大器中。声光偏转器可以将种子光偏转不同的角度,经聚焦透镜后,出射信号光的角度的偏转转换为主放光纤注入断面的空间偏移,这样,信号光在主放光纤纤芯的位置就可以通过电路进行控制,实现光纤中激发模式的主动电路控制。

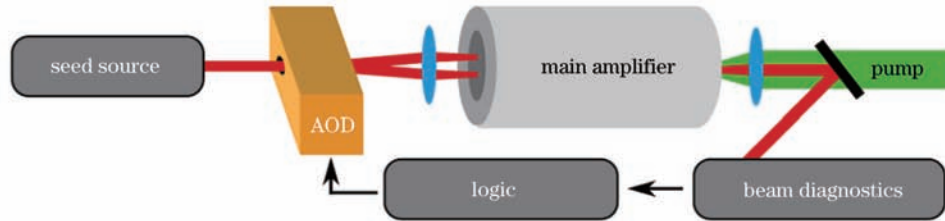


图3 动态模式激发控制结构图

Fig.3 Sketch of the dynamic mode excitation setup

控制声光偏转器上施加的信号,使信号光入射到主放光纤纤芯的两个关于中心对称的位置,则光纤内激发的模式成分相同,两个位置处模式不稳定出现的阈值功率不变,唯一的的不同是模式干涉形成的干涉图样之间有 π 相移,如图4所示。

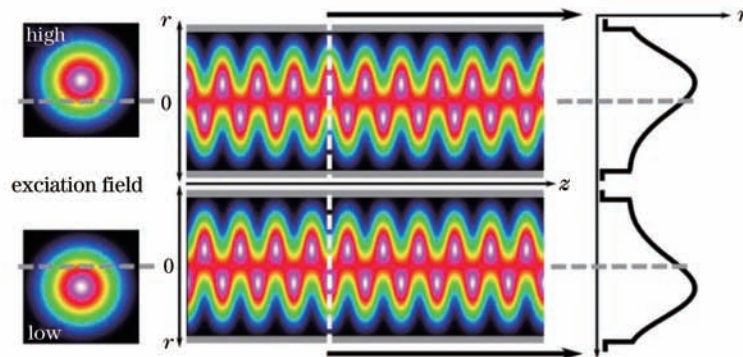


图4 光纤输入端不同位置注入和相对应的纤芯中光场分布示意图

Fig.4 Sketch of the different positions of the beam at the input end and corresponding intensity interference patterns

若信号光分别在两个位置入射的时间足够长,热致长周期折射率光栅也会有 π 的相移。当信号光入射点在两个位置之间迅速切换时,两个位置激发的热致光栅将会互相影响而削弱,提高模式不稳定现象出现

的阈值,如图5所示:当控制系统开环时,输出光束模式不稳定[图5(a)];当控制系统闭环后,输出光束模式稳定[图5(b)]。耶拿大学的研究人员利用该方法,将模式不稳定现象阈值功率提高了三倍。

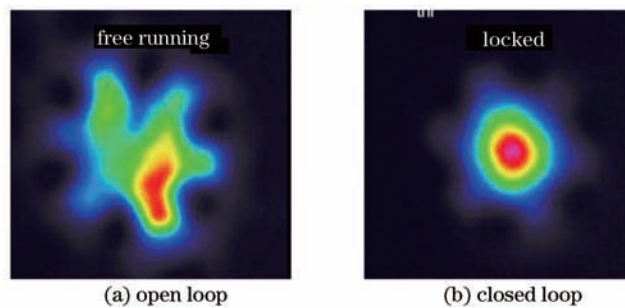


图5 模式不稳定性抑制

Fig.5 Mitigation of mode instabilities

4.2 设计新型光纤

由于模式不稳定现象与高阶模激发有关,因此,可以设计抑制高阶模产生、对高阶模大损耗、更“单模”的新型光纤消除模式不稳定现象。耶拿大学的研究人员提出了大间距光纤(LPF),结构如图6所示^[14],其中 Λ 为空气孔间距,绿色部分为掺杂区域。大间距指间距 Λ 大于10倍波长。由于该光纤具有开放的波导结构,对高阶模有很强的非定域作用,离域的高阶模增益大大减小,同时,非定域作用还可以抑制光纤中高阶模的激发,因此,大间距光纤可以将模式不稳定阈值功率提高,实验结果表明可以提高接近3倍^[7]。

丹麦科技大学的研究人员分别提出了分布式模式过滤(DMF)光纤^[88],光纤结构如图7所示,其中红色为纤芯区域,浅蓝色区域是高折射率区,白色为空气孔,图7(a)为图7(b)中红色虚线部分的实物结构图。

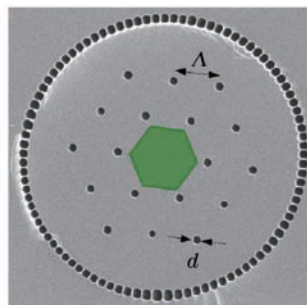


图6 大间距光纤端面结构图

Fig.6 Microscope image of LPF with the Yb-doped area highlighted

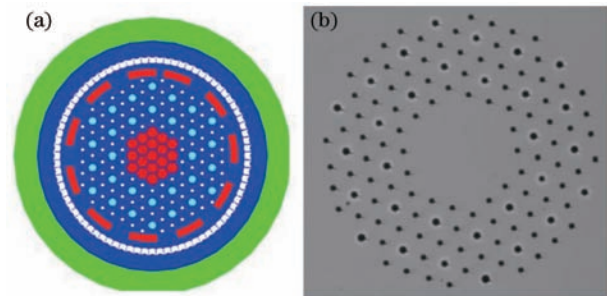


图7 分布式模式过滤光纤结构图

Fig.7 Microscope image of DMF

通过设计光纤的折射率分布,将高阶模耦合到高折射率的包层中,不在纤芯中传输,从而抑制高阶模。图8给出了注入光偏离光纤纤芯中心位置时,分布式模式过滤光纤的输出近场光斑。从图中可以看出,高阶模在高折射率部分传输,而纤芯中没有激发高阶模。该结构可以提高基于大模场面积光纤的光纤放大器的模式不稳定阈值功率,实验中提高到1.5倍^[19]。

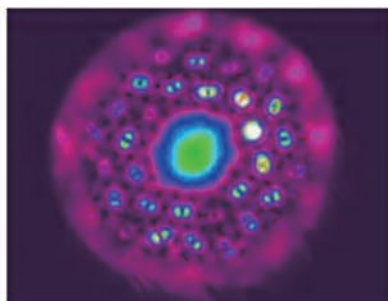


图8 分布式模式过滤光纤近场光斑

Fig.8 Near-field image of DMF

耶拿大学的研究人员还提出了通过部分掺杂来调高模式不稳定现象出现的功率阈值^[8]。部分掺杂即掺

杂区域小于纤芯区域,如图9所示^[32],其中红色框区域为纤芯,绿色为掺杂区域。这样的掺杂结构可以使基模和高阶模的增益不同,达到抑制高阶模的作用,从而提高模式不稳定现象出现的阈值功率。

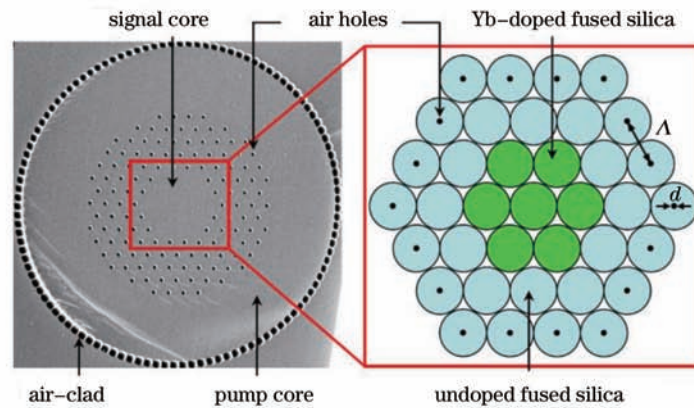


图9 部分掺杂光纤示意图

Fig.9 Schematic of the preferential gain fiber

4.3 同带抽运

目前国际上输出功率最高的光纤激光器是采用同带抽运实现的^[1]。同带抽运方案不仅可以有效提高抽运光亮度,而且作为抽运光的光纤激光波长与激光器出射波长更接近,可以有效减小量子亏损。由于模式不稳定性产生的根源是热效应,而量子亏损是光纤激光中最主要的热源,因此,同带抽运可以提高模式不稳定现象出现的功率阈值^[39],理论计算表明可以提高至少2倍^[40]。

4.4 其他方法

通过增益动力学,改变增益和粒子数反转,也可提高模式不稳定现象发生的阈值功率。丹麦科技大学利用提高种子激光功率的方法,将模式不稳定现象出现的阈值功率从不到216 W提高到292 W^[39]。另一方面,模式不稳定现象与光纤中的热负荷有关,可以通过增加光纤长度、降低掺杂浓度、减小抽运吸收^[41]等减小光纤中的热负荷,提高模式不稳定现象出现的阈值。但是,对于单频和窄线宽光纤激光,增加光纤长度会降低SBS效应出现阈值,因此需合理考虑光纤参数。

5 结束语

模式不稳定现象已经成为高亮度、高功率光纤激光功率提升的最大限制因素之一。近年来,模式不稳定现象的研究已经成为高功率光纤激光领域的研究热点之一,并取得了很多有意义的结果,使人们对光纤激光中的热力学性能有了更深入的认识。为了克服模式不稳定现象对功率提升的影响,科研人员提出了一些有效的方案,已经看到了突破高功率、高光束质量光纤激光中模式不稳定总是的曙光。但解决高功率光纤激光中的模式不稳定现象还存在许多理论和技术问题:关于模式不稳定现象中相移的产生机理假设目前尚无实验支撑,还需开展模式不稳定现象物理机理的深入实验研究;目前研究主要集中在光子晶体光纤和微结构光纤,采用空间耦合结构的光纤激光系统,关于全光纤结构中的模式不稳定现象及抑制技术鲜有报道;抑制模式不稳定现象的方法还有待进一步挖掘和研究。

参考文献

- 1 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.
- 2 Wei Jingbo, Hu Guijun, Du Yang, *et al.*. High power all-optical gain-clamped fiber amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706012.
魏敬波, 胡贵军, 杜洋, 等. 全光增益控制高功率光纤放大器[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706012.
- 3 Zhou Jun, He Bing, Xue Yuhao, *et al.* Study on passive coherent beam combination technology of high power fiber laser arrays [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900129.
周军, 何兵, 薛宇豪, 等. 高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900129.

- 4 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502003.
代守军, 何兵, 周军, 等. 高功率散热技术及高功率光纤激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502003.
- 5 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW Yb-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.
- 6 Li Jie, Chen Zilun, Zhou Hang, *et al.*. Status and development of pumping technology for high power fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 020003.
李杰, 陈子伦, 周航, 等. 高功率光纤激光器抽运耦合技术的现状和发展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 020003.
- 7 C Jauregui, T Eidam, H-J Otto, *et al.*. Physical origin of mode instabilities in high-power fiber laser systems [J]. Opt Express, 2012, 20(12): 12912-12925.
- 8 T Eidam, C Wirth, C Jauregui, *et al.*. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2011, 19(14): 13218-13224.
- 9 D Engin, W Lu, H Verdun, *et al.*. High power modal instability measurements of very large mode area (VLMA) step index fibers [C]. SPIE, 2013, 8733: 87330J.
- 10 T Eidam, S Hanf, E Seise, *et al.*. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power [J]. Opt Lett, 2010, 35(2): 94-96.
- 11 F Stutzki, H-J Otto, F Jansen, *et al.*. High-speed modal decomposition of mode instabilities in high-power fiber lasers [J]. Opt Lett, 2011, 36(23): 4572-4574.
- 12 H-J Otto, C Jauregui, F Stutzki. Controlling mode instabilities by dynamic mode excitation with an acousto-optic deflector [J]. Opt Express, 2013, 21(14): 17285-17298.
- 13 M Laurila, M M Jørgensen, K R Hansen, *et al.*. Distributed mode filtering rod fiber amplifier delivering 292 W with improved mode stability [J]. Opt Express, 2012, 20(5): 5742-5753.
- 14 F Jansen, F Stutzki, H J Otto, *et al.*. Thermally induced waveguide changes in active fibers [J]. Opt Express, 2012, 20(4): 3997-4008.
- 15 B Ward, C Robin, I Dajani. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2012, 20(10): 11407-11422.
- 16 H-J Otto, F Stutzki, F Jansen, *et al.*. Temporal dynamics of mode-instabilities in high power fiber lasers and amplifiers [J]. Opt Express, 2012, 20(14): 15710-15722.
- 17 N Haarlammert, O de Vries, A Liem, *et al.*. Build up and decay of mode instability in a high power fiber amplifier [J]. Opt Express, 2012, 20(12): 13274-13283.
- 18 C Jauregui, T Eidam, J Limpert, *et al.*. The impact of modal interference on the beam quality of high-power fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2011, 19(4): 3258-3271.
- 19 A V Smith, J J Smith. Mode instability in high power fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- 20 A V Smith, Jesse J Smith. Steady-periodic method for modeling mode instability in fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2013, 21(3): 2606-2623.
- 21 A V Smith, J J Smith. Influence of pump and seed modulation on the mode instability thresholds of fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2012, 20(22): 24545-24558.
- 22 K R Hansen, T T Alkeskjold, J Broeng, *et al.*. Thermally induced mode coupling in rare-earth doped fiber amplifiers [J]. Opt Lett, 2012, 37(12): 2382-2384.
- 23 K R Hansen, T T Alkeskjold, J Broeng, *et al.*. Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2013, 21(2): 1944-1971.
- 24 L Dong. Stimulated thermal Rayleigh scattering in optical fibers [J]. Opt Express, 2013, 21(3): 2642-2656.
- 25 I-Ning Hu, C Zhu, C Zhang, *et al.*. Analytical time-dependent theory of thermally-induced modal instabilities in high power fiber amplifiers [C]. SPIE, 2013, 8601: 860109.
- 26 C Jauregui, H-J Otto, F Jansen, *et al.*. Mode instabilities: physical origin and mitigation strategies [C]. SPIE, 2013, 8601: 86010F.
- 27 C Jauregui, H-J Otto, F Stutzki, *et al.*. Passive mitigation strategies for mode instabilities in high-power fiber laser systems [J]. Opt Express, 2013, 21(16): 19375-19386.
- 28 B Ward. Modeling of transient modal instability in fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2013, 21(10): 12053-12067.

- 29 S Naderi, I Dajani, T Madden, *et al.*. Investigations of modal instabilities in fiber amplifiers through detailed numerical simulations [J]. *Opt Express*, 2013, 21(13): 16111–16129.
- 30 C Wirth, T Schreiber, M Rekas, *et al.*. High-power linear-polarized narrow linewidth photonic crystal fiber amplifier [C]. *SPIE*, 2010, 7580: 75801H.
- 31 O Schmidt, M Rekas, C Wirth, *et al.*. High power narrow-band fiber-based ASE source [J]. *Opt Express*, 2011, 19(5): 4421–4427.
- 32 T Eidam, S Hädrich, F Jansen, *et al.*. Preferential gain photonic-crystal fiber for mode stabilization at high average powers [J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 8656–8661.
- 33 F Stutzki, F Jansen, T Eidam, *et al.*. High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(5): 689–691.
- 34 M M Jørgensen, M Laurila, D Noordegraaf, *et al.*. Thermal-recovery of modal instability in rod fiber amplifiers [C]. *SPIE*, 2013, 8601: 86010U.
- 35 C Wirth, O Schmidt, I Tsybin, *et al.*. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(16): 3118–3120.
- 36 C Jocher, T Eidama, S Hädrich, *et al.*. 23 fs pulses at 250 W of average power from a FCPA with solid core nonlinear compression [C]. *SPIE*, 2013, 8601: 86011F.
- 37 M Karow, H Tünnermann, J Neumann, *et al.*. Beam quality degradation of a single-frequency Yb-doped photonic crystal fiber amplifier with low mode instability threshold power [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(20): 4242–4244.
- 38 M Laurila, J Saby, T T Alkeskjold, *et al.*. Q-switching and efficient harmonic generation from a single-mode LMA photonic bandgap rod fiber laser [J]. *Opt Express*, 2011, 19 (11): 10824–10833.
- 39 T J Wagner. Fiber laser beam combining and power scaling progress, Air Force Research Laboratory Laser Division [C]. *SPIE*, 2012, 8237: 823718.
- 40 Tao Rumao, Wang Xiaolin, Xiao Hu, *et al.*. Theoretical study of the threshold power of mode instability in high-power fiber amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0114002.
陶汝茂, 王小林, 肖虎, 等. 高功率光纤放大器中模式不稳定阈值功率的理论研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0114002.
- 41 C Robin, I Dajani, C Zeringue, *et al.*. Gain-tailored SBS suppressing photonic crystal fibers for high power applications [C]. *SPIE*, 2012, 8237: 82371D.