



·光纤激光器·

光纤激光模式不稳定研究十年回顾与展望*

王建军, 刘 琦, 李 敏, 冯 曦, 楚秋慧, 张 春,
高 聪, 陶汝茂, 林宏奂, 景 峰

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 2010 年模式不稳定现象首次报道, 开启了光纤激光与废热的斗争史。回顾了 10 年来模式不稳定现象的研究进展, 概述了光纤激光模式不稳定物理表征、基本原理、理论研究、影响因素和抑制策略等, 介绍了高功率光纤激光在模式不稳定抑制方面取得的最新成果, 展望了高功率光纤激光模式不稳定研究的未来发展, 对光纤激光模式不稳定未来可能的研究方向进行了展望。

关键词: 模式不稳定; 光纤激光; 热效应; 量子亏损; 增益饱和

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.200180

Ten-year review and prospect on mode instability research of fiber lasers

Wang Jianjun, Liu Yu, Li Min, Feng Xi, Chu Qihui, Zhang Chun,
Gao Cong, Tao Rumao, Lin Honghuan, Jing Feng

(Laser Fusion Research Center, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: The report about mode instability in 2010 has begun the history of struggling with the waste heat in fiber lasers. This paper presents a 10-year research progress of mode instability research, including physical demonstrations, physical mechanism, theoretical investigation, various impact factors and effective mitigating strategies. The most recent results on mode instability suppressing are also included as well as the future development trend of mode instability research.

Key words: mode instability; fiber laser; thermal effect; quantum defect; gain saturation

1960 年, 休斯飞机 (Hughes Aircraft) 公司的梅曼博士 (Theodore Harold Maiman) 发明激光器, 翌年, 来自美国光学 (America Optical) 公司的斯尼策 (Elias Snitzer) 研制了世界上第一台光纤激光器^[1]。光纤激光具有空间相干性好、结构紧凑、热管理方便等优点, 在先进制造业、国防工业、前沿科研、精准医疗、雷达通信等众多领域有着重要的应用前景, 是国际上激光技术领域的研究热点, 而光纤激光独特的亮度和散热优势更是赋予了其在高功率激光领域的特殊地位^[2-8]。近年来, 以美国 IPG Photonics 公司、Nufern 公司、nLIGHT 公司、空军研究实验室、英国南安普顿 (Southampton) 大学、SPI 公司和德国耶拿 (Jena) 大学等为代表的国外研究机构、公司不断加大高功率光纤激光器研究力度, 推动高亮度半导体泵浦技术和大模场面积双包层光纤制造工艺的快速发展, 光纤激光的输出功率有了量级的提升, 2009 年, 掺镱光纤激光的单纤单模输出功率成功迈进万 W 门槛^[9], 高功率光纤激光的优势在各个应用领域不断凸显。

2010 年, 德国耶拿大学的研究人员在啁啾脉冲放大飞秒光纤激光系统中首次公开报道了模式不稳定现象^[10], 至此开启了光纤激光领域的废热斗争史, 光纤激光功率也同时进入缓慢增长期, 2013 年 IPG Photonics 公司推出 20 kW 单模激光器后再无更高功率的公开报道^[11]。尽管中国在高功率光纤激光领域高歌猛进, 中国工程物理研究院^[12-14]、中国科学院上海光学精密机械研究所^[15]均公开报道了单纤万 W 的功率结果, 但光纤模式控制并未相应地取得突破, 光纤激光光束质量仍有待进一步突破。自 2010 年德国耶拿大学的研究人员首次报道高功率光纤激光的模式

* 收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2020-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61905226)

作者简介: 王建军 (1974—), 男, 研究员, 主要从事高功率光纤激光技术研究; wjjaep@caep.cn。

通信作者: 陶汝茂 (1987—), 男, 副研究员, 主要从事高功率光纤激光技术研究; taorumao@sohu.com。

不稳定现象以来,模式不稳定引起了各国研究人员的广泛关注,成为高功率光纤激光领域一个新的研究方向与热点,到2020年光纤激光模式不稳定研究经历了第一个10年。随着模式不稳定研究的大量开展,对模式不稳定物理机理、影响因素认识逐渐深入,并提出了一些有效的抑制方法,而高功率光纤激光也在与废热导致模式不稳定现象的斗争中坚定前行,阈值功率从最初的kW水平提升到5kW甚至以上^[16-18]。本文详细回顾发现模式不稳定现象10年来的研究进展,对模式不稳定物理机理、影响因素以及抑制技术等进行介绍和总结,以为高功率光纤激光下一步发展方向理清思路、提供启发。

1 模式不稳定现象

1.1 模式不稳定的典型物理表征

模式不稳定现象指输出功率超过某个阈值功率后,光纤激光的输出模式由稳定的基模变为能量在不同模式之间以ms尺度动态耦合的非稳态模式,导致输出光束的指向性和光束质量突然退化。模式不稳定具有“阈值性”,只有泵浦/输出功率超过特定功率后,模式不稳定性现象才发生,而将功率降低到特定功率以下,模式不稳定现象消失。模式不稳定性现象公开报道后,研究人员提出了多种方法从时频空域对模式不稳定现象开展分析^[19-22],获得了大量的实验数据,研究表明,光纤激光中的模式不稳定有以下典型物理表征^[23-24]:

(1)模式不稳定发生后,能量耦合通常最先发生在基模和第一个高阶模之间,即 LP_{01} 模式和 LP_{11} 模式之间,然后随着功率增加,会出现更高阶模式的能量耦合;

(2)模式不稳定的时域特性在阈值附近具有“周期性”,特征耦合频率在kHz量级;随着输出功率升高,模式不稳定时域特性的频谱会展宽并失去周期性而趋于“混沌”;

(3)模式不稳定现象具有数ms量级的生长时间和存续时间,即功率突然增加到大于模式不稳定阈值 P_{th} 时,模式不稳定现象不会突然出现,会有ms级的滞后,而输出功率突然降低到小于阈值时,模式不稳定现象不会突然消失,会有几ms的持续时间,生长时间和存续时间的具体值与光纤参数直接相关;

(4)模式不稳定现象不影响增益系统的能量提取效率,对于空间结构的光纤激光器,模式不稳定现象发生后,输出功率仍可以持续增加,但对于带包层光滤除的全光纤激光器,输出功率可能会由于包层光剥除高阶模功率出现滞涨^[25],但具体现象与光纤参数相关^[26-27];

(5)模式不稳定现象发生后,模式耦合在相同偏振态的模式间发生,消光比不变^[21],但光纤弯曲盘绕会导致模式不稳定发生后消光比发生退化^[26,28]。

上述物理表征并没有将模式不稳定现象的物理表征完全囊括,而且模式不稳定现象在不同的光纤中、不同的激光器结构中,具体物理表征并不是一成不变的,会表现出丰富的差异性,比如热导引折射率反导引芯光纤中模式不稳定能量耦合发生在径向对称模式之间^[29],振荡器中模式不稳定的时域特性,从百Hz到kHz的特征频率均有报道^[30-34]。因此,需要结合激光系统实际进行分析和判断。

1.2 模式不稳定的物理机理

通过对模式不稳定物理表征的实验研究,研究人员发现模式不稳定现象时频特征尺度在ms/kHz量级,生长和存续时间在ms量级,而且阈值仅与平均功率相关,种种迹象都与热效应吻合,经过耶拿大学、AS-Photonics公司等单位研究人员在理论方面不断的探索,最终锁定光纤激光模式不稳定发生的根源——光纤中废热导致的热效应^[35-41],具体过程为^[38]:由于大模场面积光纤纤芯支持多个模式,当信号光注入主放光纤时,虽然主要能量集中在基模,但是不可避免地会激发少量的高阶模式。基模和高阶模干涉会在光纤中形成周期性光强分布;当泵浦光注入、信号光开始被放大后,纤芯掺杂区会形成周期性的泵浦光提取,而量子亏损产热与泵浦光吸收相关,因此会形成准周期性振荡的热负荷分布,最终形成周期性的温度分布;由于热光效应,纤芯中准周期性温度分布调制纤芯中的折射率分布,形成长周期折射率光栅,热致折射率光栅满足相位匹配条件,可以实现基模和高阶模的能量耦合。

1.3 相移产生机理的科学争议

信号光注入激发的高阶模与基模角频率相等,因此,基模和高阶模光场干涉导致的长周期折射率光栅与干涉光场同相^[36,42]。对于非线性介质中的同向双波耦合,当干涉光场与折射率光栅无相移时,泵浦光束和信号光束之间没有能量耦合,只有相移不为零才能发生能量耦合^[43]。因此,干涉光场与热致长周期光栅之间还需有相移才能发生能量耦合。A. V. Smith等认为噪声(量子噪声、自发热瑞利散射、强度噪声)、泵浦调制等可以激发频移的高阶模^[44-45],导致折射率光栅沿光纤移动而产生相移,热致模式不稳定本质上是受激热瑞利散射^[45]。耶拿大学等提出

相移是由非绝热波导改变引起的^[38]。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。目前关于干涉光场与折射率调制长周期光栅相移的产生原因还没有定论,但已建立的解析和半解析理论模型均采用频移假设,部分声称无频移的全数值模型后来经验证数值噪声会导致频移^[46-47],本质上也是基模和高阶模之间有频移导致相移产生的,因此也改用频移假设来进行数值仿真^[48-49]。

2 模式不稳定现象理论研究

在模式不稳定现象物理表征、物理机理认识的基础上,广大研究人员基于不同的数值和理论方法,建立了多种研究模式不稳定现象的理论模型。

2.1 模式不稳定理论模型

基于光纤中废热和模间干涉导致长周期光栅模式不稳定的物理机理,各国研究人员纷纷建立理论模型来研究光纤激光模式不稳定,可以分为两类:数值模型,主要是美国 AS 光子公司^[50]、美国空军学院^[47]、美国空军研究实验室^[51]、美国密歇根大学^[41]、美国中佛罗里达大学^[52]、新加坡南洋科技大学^[53]、中国工程物理研究院^[54]、华中科技大学^[55];解析模型,主要是丹麦科技大学^[56-57]、美国克莱姆森大学^[40]、美国 MDM Optics 公司^[58]、德国耶拿大学^[59]、国防科技大学^[60-61]、中国工程物理研究院^[62]、英国南安普顿大学^[63]。由于描述光纤中光束传输和求解热传导方程的数值方法成熟,已建立的光纤激光模式不稳定理论模型大部分为数值模型。数值模型可以考虑大量的物理因素影响,计算结果也更精确,但模式不稳定的内在物理过程由数值仿真表征,难以清晰直观地反映模式不稳定的物理过程以及各个影响因素与模式不稳定的内在联系。而且数值模型计算量大、需要耗费大量的计算资源与时间,例如空军研究实验室的 S. Naderi 等的模型需要利用超算资源计算几天^[51]。德国耶拿大学的 C. Jauregui 等建立的解析经验模型,可以用于定量计算模式不稳定的阈值,且不受计算速度的限制,但无法反映模式不稳定的物理过程以及各个影响因素与模式不稳定的内在联系,而且由于需要将理论计算结果与实际实验结果进行拟合^[59]。通过采用合理近似,丹麦科技大学、美国克莱姆森大学、国防科技大学、中国工程物理研究院等单位的研究人员建立了光纤激光模式不稳定的解析模型,获得了描述模式不稳定的解析表达式,清楚地反映了模式不稳定与各个物理量的关系,而且大幅提升了计算速度,在实际工程中得到应用^[61-62, 27]。英国南安普顿大学的研究人员利用扰动理论建立了模式不稳定理论模型,并获得了类似 SBS 和 SRS 的阈值功率简单计算公式^[63],但该公式计算模式不稳定阈值随着归一化频率 V 值增加而增大,与实验现象存在差异,需要进一步修订。此外,现有模型大部分为放大器模型,振荡器理论模型较少,这主要是由于振荡器需要考虑双向干涉光场的相互作用,而且振荡器需要反复迭代,考虑温度分布的数值求解计算量巨大,基于现有消费级的计算资源难以实现全数值模型计算,需要建立解析模型。中国科学院西安光学精密机械研究所的研究人员建立了振荡器的模式不稳定理论模型,但无法考虑振荡器的时频特性^[64]。

2.2 模式不稳定物理现象的理论解释

科研人员建立模式不稳定模型之后,首先对实验观察到的模式不稳定物理表征进行了理论验证,在验证理论的同时探索模式不稳定的内在物理机理。下面对这一过程中的若干里程碑按照时间序列依次呈现。

(1)2011年, A. V. Smith 等基于全数值理论模型首先从理论上阐释了模式不稳定的阈值特性和频域耦合特性^[36]。

(2)2012年, A. V. Smith 等计算了基模与不同高阶模式的非线性耦合增益,从理论上解释了模式不稳定发生时,能量耦合最先发生在基模和 LP_{11} 模式的原因:基模与 LP_{11} 模式的耦合最强,导致模式不稳定中能量耦合在基模与 LP_{11} 模式之间最先发生^[44]。同年,美国空军的研究人员首次利用理论模型仿真了模式不稳定的时域特性,获得了与实验现象吻合的理论结果^[39]。

(3)2013年, A. V. Smith 等首次研究了光子暗化对模式不稳定的影响,发现光子暗化会导致模式不稳定阈值和放大器斜率效率下降^[65],与实验观察的现象吻合^[66]。而丹麦科技大学的 K. R. Hansen 等首次解释了信号光功率、高阶模成分、线宽等对模式不稳定的影响^[56]。

(4)2015年,耶拿大学和国防科技大学的研究人员分别用不同的模型解释了模式不稳定阈值随信号光波长变化的结果^[59, 67]。

总之,在观察到模式不稳定现象后的5年间,基于已有的光纤激光模式不稳定模型,大部分模式不稳定物理现象已经获得了合理的理论解释,但随着振荡器、拉曼放大器等不同类型不同波段光纤激光器功率不断提升和热效应不断积累,更多样化、更丰富的模式不稳定物理现象不断涌现^[30-34, 68-75],现有理论模型已难以满足理论研究的需要,亟待深入开展不同类型光纤激光模式不稳定理论研究工作^[48, 76-79]。

3 模式不稳定影响因素

不同于传统高能激光,模式不稳定是热效应与光纤模式的耦合导致的,因此,模式不稳定的影响因素除了与废热有关还与光纤的模式特性有关,即与镱离子掺杂、光/辐致暗化、泵浦特性、信号特性、光纤材料等决定废热的参数以及光纤纤芯直径、包层直径、数值孔径、高阶模损耗等关系光纤模式参数密切关联^[80]。本节从光纤产热和光纤模式两方面出发,介绍模式不稳定的影响因素。

3.1 光纤废热影响因素

3.1.1 光纤掺杂特性的影响

(1) 掺杂浓度

在光纤其他参数不变的情况下,由于改变掺杂浓度或掺杂浓度沿光纤纵向的分布,并未改变量子亏损或增益饱和,模式不稳定与光纤的掺杂浓度无关^[81-83]。此外,只要光纤掺杂浓度在纤芯横截面上是均匀分布的,模式不稳定的阈值与掺杂浓度沿光纤纵向的分布无关,与实验结果吻合^[81]。

(2) 掺杂区域半径

随掺杂区域直径减小,高阶模与掺杂区域重叠减小,高阶模放大减弱,更重要的是热源位于纤芯中心位置,而引起模式耦合的温度梯度在纤芯中央区域变化很小^[72],导致模式不稳定的阈值增大。

3.1.2 暗化的影响

当光子暗化导致激光系统效率下降 5% 时,模式不稳定阈值下降超过 60%;即使系统效率无明显下降($<2\%$),模式不稳定阈值下降也会高达 40%^[84]。因此,当光子暗化效应增强(效率下降),光纤中产热会增加,导致模式不稳定阈值下降,与实验结果吻合。此外,辐致暗化也会导致光纤中产热大幅增加、模式不稳定阈值大幅下降^[72]。

3.1.3 信号特性的影响

(1) 信号光功率

阈值功率和提取功率(阈值输出功率-注入信号功率)随着注入信号光功率的增加而增大^[84]。

(2) 信号强度噪声

相对强度噪声(RIN)导致的模式不稳定阈值明显低于量子噪声(QN)引起的模式不稳定阈值,而且随着相对强度噪声增强,模式不稳定功率阈值下降^[60]。

(3) 信号光初始高阶模比例

模式不稳定阈值随初始高阶模成分的增加而降低,与实验结果吻合^[85]。需要说明的是,对于宽谱激光系统,随着高阶模成分增加,测量的模式不稳定阈值反而会大幅增加,这是由于宽谱激光相干长度很短,基模和高阶模是非相干叠加,高阶模增加不会对模式耦合产生影响,仅仅导致光束质量恶化、模式不稳定测量阈值增加^[86],反而会观察到“光束质量越好、模式不稳定阈值越低”的有悖常理的现象^[87]。

(4) 信号光波长

模式不稳定阈值与信号光波长有关^[67]:当信号光波长在 1032 nm 附近时,信号发射系数最大,导致上能级反转粒子数减小,增益饱和效应增强,模式不稳定阈值有极大值,是 1070 nm 附近阈值的三倍;当信号光波长向更长波或更短波方向漂移时,信号发射系数减小,模式不稳定的阈值会下降且在长波方向下降更快。

(5) 信号强度调制

信号光强度调制会导致模式不稳定阈值下降,而且阈值下降幅度与调制频率相关。上述结果与实验结果基本吻合。

3.1.4 泵浦特性的影响

(1) 泵浦功率

沿着增益光纤,泵浦功率是逐渐减小,上能级的反转粒子数会减小,导致空间烧孔效应增强,因此,最大耦合频率沿着光纤的注入端到输出端不断减小^[88]。而在光纤同一位置,随着注入泵浦功率的升高,上能级的反转粒子数会增加,导致空间烧孔效应减弱,最大耦合频率也增大。此外,对于大芯径的光纤(纤芯直径大于 30 μm),随着泵浦功率增加,光纤中的热透镜效应增强,也会导致耦合频率向高频方向漂移。

(2) 泵浦波长

模式不稳定阈值与泵浦波长有关,当泵浦波长从 976 nm 变为 915、970 和 985 nm 时,泵浦吸收系数减小,增益

饱和增强,模式不稳定的阈值功率可以提高^[27]。此外,随着纤芯直径的增加,通过改变泵浦波长抑制模式不稳定的效果减弱。采用同带泵浦方案时,模式不稳定阈值随泵浦波长变化而改变,但对于纤芯直径 30 μm 的光纤,在 1000~1035 nm 的范围内,阈值变化小于 15%。不同比例的 915 nm 和 976 nm 泵浦光混合泵浦时,发现模式不稳定阈值与泵浦光中不同波长泵浦光混合的比例有关:当泵浦光中 915 nm 泵浦光功率比例增加时,模式不稳定阈值增加^[89]。

(3) 泵浦强度调制

泵浦光强度调制会导致模式不稳定阈值下降,而且阈值下降幅度同样与调制频率相关。上述结果与实验结果基本吻合。实验研究表明,泵浦强度调制对模式不稳定阈值影响比信号强度调制的影响更大^[90],而理论研究正好相反或差别不明显,需要开展进一步的理论和实验研究。

3.1.5 泵浦方式的影响

(1) 泵浦方向

根据泵浦光注入的方向,光纤放大器的泵浦方式可以分为前向泵浦、后向泵浦和双向泵浦。采用后向泵浦可以提高阈值功率,然而,随着纤芯直径的增加、纤芯包层比增大,模式不稳定阈值提升效果减弱^[89]。采用双向泵浦方案,可以提高模式不稳定阈值。此外,通过优化前向功率与后向功率的比例,可以获得最优的模式不稳定阈值提升效果:随着后向泵浦功率比例的增加,双向泵浦的模式不稳定阈值会先增加,到达最大值后又会减小,存在一个最优值。随着纤芯直径的增加,最优值对应的后向泵浦功率比例会从小变大。

(2) 侧边泵浦

采用侧面泵浦技术时,随着泵浦点增加,光纤中泵浦功率分布均匀,改变光纤中增益饱和分布,导致模式不稳定阈值增加^[89]。分布式侧边泵浦光纤是典型的侧面泵浦结构,理论计算表明,采用分布式侧边泵浦光纤可以大幅提升模式不稳定阈值^[91]。

3.1.6 光纤材料的影响

目前,除了硅基光纤,磷酸盐材料和钇铝石榴石(YAG)等材料也可以被用于拉制光纤。研究表明^[89],光纤材料对模式不稳定阈值有明显影响,采用 YAG 材料拉制掺镱光纤,模式不稳定阈值可以提高 8 倍。

3.2 光纤模式影响因素

3.2.1 光纤纤芯/包层直径

研究表明,随着纤芯包层比减小,增益饱和和效应增强,导致模式不稳定的阈值增加。

3.2.2 光纤纤芯数值孔径

研究表明^[92],随着纤芯数值孔径减小,归一化频率 V 也减小,纤芯对模式的束缚能力减弱,模场分布向包层中延伸。高阶模模场分布向包层中延伸大于基模,导致高阶模与掺杂区域重叠减小程度大于基模与掺杂区域重叠减小程度,高阶模放大减弱。因此,模式不稳定的阈值随纤芯数值孔径减小而增加。

3.2.3 高阶模损耗

随着高阶模损耗增大,系统对高阶模的抑制能力增强,导致模式不稳定阈值增加。

3.2.4 系统制冷能力

研究结果表明^[89],制冷方式对光纤激光模式不稳定阈值没有影响。前述结果未考虑制冷对光纤折射率的影响,而制冷增强会导致光纤温度降低、热光效应减弱,光纤折射率发生变化,间接导致光纤支持模式、弯曲损耗等发生改变,影响模式不稳定阈值^[54,93]。

3.2.5 光纤保偏特性

由于 l_p (l_p 为斯托克斯光相对于泵浦光偏转方向旋转一周所对应的光纤长度)远大于增益光纤长度,因此,光纤中信号光的偏振态对模式不稳定阈值几乎没有影响^[94]。文献 [95] 中报道通过偏振控制获得线偏激光时,模式不稳定阈值大幅下降,是由于控制信号导致偏振态动态变化,而且变化频率在 kHz 范围,与模式不稳定的耦合频率重合,导致控制信号增强了系统的强度调制噪声,引起模式不稳定阈值下降。通过改变调制频率,使调制频率大于或小于模式耦合频率,可以有效抑制偏振变化导致的模式不稳定阈值下降。

3.2.6 信号光线宽

当信号光线宽较小时,相干长度 l_c 较大。基模和高阶模在增益光纤中传输时,两个模式之间的空间失配量(Δ)远小于信号光的相干长度,则线宽对模式干涉的影响可以忽略,即线宽对模式不稳定无影响。而当信号光线宽增

加到一定程度, Δ 与 I_s 相比不能忽略时, 则增益光纤中的模间干涉削弱, 导致热致折射率光栅减弱, 模式不稳定阈值提高。随着增益光纤长度增加, $\Delta\lambda_0$ 减小, 即可以忽略线宽影响的范围减小; 光纤纤芯直径越大, $\Delta\lambda_0$ 越大; 随着纤芯数值孔径(NA)的增大, $\Delta\lambda_0$ 减小。

4 模式不稳定抑制策略

模式不稳定不同于传统高能激光的废热效应, 它还与光纤中的模式相关, 第3节介绍了模式不稳定的影响因素, 通过分析发现, 上述影响因素分别从内部和外部对模式不稳定施加影响, 从内部主要是影响光纤中的增益饱和、量子亏损、额外热源等, 对废热导致的温度梯度产生影响, 而外部主要是系统的高阶模抑制能力, 对光纤的模式进行有效控制。因此, 模式不稳定抑制方案的探索也应从前述方面进行考虑, 主要从增加模式管控能力和热管理能力方面下手^[80]。

4.1 增强模式管控能力

4.1.1 增大高阶模弯曲损耗

(1) 减小弯曲半径

光纤中模式的弯曲损耗随弯曲半径减小而增大, 且高阶模的弯曲损耗远大于基模弯曲损耗。因此, 减小光纤的弯曲半径, 通过弯曲选模可以提高模式不稳定的阈值。2015年, 国防科技大学和中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员分别从实验上验证了可以通过减小光纤弯曲半径, 增加高阶模的弯曲损耗, 提高模式不稳定的阈值^[60, 96]。2017年, 国防科技大学的研究人员利用减小光纤弯曲半径的方法获得了2.43 kW的近衍射极限的线偏振激光。虽然模式不稳定的阈值可通过减小光纤弯曲半径提高, 但弯曲会导致光纤模场面积减小, 降低其他非线性效应阈值^[97-98], 而且系统长时间高功率运行的稳定性难以有效保证^[98-99]。

(2) 减小纤芯数值孔径

减小纤芯数值孔径, 可以增加相同弯曲半径时的弯曲损耗。若20/400增益光纤按照螺旋方式盘绕, 相同弯曲盘绕时(例如起始弯曲直径14 cm, 每一圈弯曲直径增加3 mm, 弯曲光纤长度14 m), 纤芯数值孔径0.065的光纤的阈值不到800 W, 而纤芯数值孔径0.060的光纤的阈值高于3.5 kW, 是前者的4倍多。因此, 结合弯曲盘绕, 减小纤芯数值孔径可以大幅提高模式不稳定的阈值。2014年, 国防科技大学的研究人员, 通过采用纤芯数值孔径较小的光纤, 增加高阶模的弯曲损耗, 在相同光纤弯曲条件下, 将模式不稳定阈值从约700 W提升到大于1 kW^[25]。2018年, 德国耶拿大学的研究人员通过弯曲盘绕超低数值孔径光纤, 获得了4.4 kW的窄线宽单模激光^[100]。但减小数值孔径会导致光纤更容易受高功率运转情况下的热效应影响^[101], 因此需要考虑高导热的光纤结构设计, 比如采用金属涂覆多包层光纤^[93]等。

(3) 优化光纤盘绕方式

采用螺旋光纤盘绕方式时, 掺杂光纤一圈一圈地由内往外盘绕, 盘绕半径由小变大。由于光纤盘绕直径由小变大, 高阶模的弯曲损耗呈指数减小。对于数值孔径为0.065的20/400光纤, 当盘绕半径大于8 cm后, 高阶模的弯曲损耗几乎可以忽略, 理论计算表明单模输出功率不到2 kW。每一圈的盘绕半径不变, 每一圈的弯曲损耗不变, 高阶模的损耗大幅增加, 可以有效抑制高阶模。将掺杂光纤盘绕在半径5 cm的圆柱上, 对于纤芯直径20 μm 的光纤, 理论计算表明可以将模式不稳定阈值提高到8 kW。

(4) 减小纤芯直径

减小纤芯直径, 光纤的归一化频率 V 减小, 纤芯对高阶模的束缚减小, 高阶模更容易通过弯曲泄漏到包层中, 导致高阶模的弯曲损耗增加。因此, 减小纤芯直径也可以提高模式不稳定阈值。2015年, 美国OFS的研究人员利用小芯径的光纤(纤芯直径14 μm), 实现了2.1 kW的单模激光输出^[102]。然而, 由于光纤纤芯较小, 导致系统最终会受限于受激拉曼散射效应、受激布里渊散射效应等。

(5) 增加信号光波长

弯曲损耗与信号光波长有关, 信号光波长越长, 弯曲损耗越大, 可以提高模式不稳定的阈值。对于拉曼放大器及混合增益光纤激光放大器, 信号光波长大于1.1 μm , 弯曲损耗远大于1 μm 。因此, 可以通过弯曲损耗提高模式不稳定阈值。然而, 信号光波长增加会导致量子亏损增大, 降低模式不稳定阈值。因此, 需要综合权衡考虑。

4.1.2 优化光纤设计

尽管通过增加高阶模弯曲损耗取得了显著效果, 模式不稳定阈值得到了显著提高, 但弯曲光纤会导致模场面

积减小、稳定运行寿命减小,不适合大芯径光纤。因此,研究人员探索通过光纤结构设计增大光纤高阶模损耗。增益裁剪光纤、大空气孔间距光纤、分布式模式过滤光纤、全固光子带隙光纤、单/多沟光纤、啁啾耦合芯光纤、凹陷内包层的多包层光纤、锥形光纤等光纤结构也具有较强的抑制高阶模能力,能有效提升模式不稳定的阈值,但新结构光纤目前单模输出功率并未超过 3 kW。2018 年,恩耐公司和密歇根大学的研究人员报道了基于啁啾耦合芯光纤实现大于 2.6 kW、20 GHz 的光纤激光放大器^[103],为新结构光纤目前公开报道的最高功率。

4.1.3 增加信号光谱宽

当信号光线宽很宽,则相干长度 l_c 较小。在光纤中传输时,若两个模式之间的空间不同步(Δ)与信号光的相干长度相比不能忽略时,则光纤中模式的干涉削弱,导致热致折射率光栅减弱,模式不稳定阈值提高。因此,通过增加信号光线宽,可以提升模式不稳定阈值。然而,对于纤芯直径大、纤芯数值孔径小、增益光纤长度短的光纤激光系统,增加线宽对模式不稳定的抑制效果不明显^[39]。

4.2 增强热管理能力

4.2.1 增强增益饱和

(1)减小纤芯包层比

减小光纤的纤芯包层比,可以增强光纤的增益饱和,提高模式不稳定阈值。30/250 光纤的模式不稳定阈值在 300~400 W,而 30/400 光纤的模式不稳定阈值约为 550 W^[26],20/400 光纤的模式不稳定阈值在 600~700 W^[25,64]。因此,通过减小光纤纤芯包层比,可以将模式不稳定阈值提升 2 倍左右。然而,纤芯包层比减小后,光纤对泵浦光的吸收会减小,在掺镱离子浓度不变的情况下,只有增加增益光纤的长度才能保证泵浦光充分吸收,导致其他非线性阈值降低。

(2)改变半导体泵浦源的波长

采用 976 nm 以外的波长泵浦,泵浦吸收系数减小,增益饱和效应增强,可以有效提高模式不稳定阈值^[44]。2015 年,国防科技大学的研究人员利用 915 nm 泵浦的方法,将纤芯 20 μm 、包层 400 μm 光纤中的模式不稳定阈值从 700 W 提升到大于 1.2 kW。然而,915 nm 处的泵浦吸收系数大约只有 976 nm 处的 1/3。因此,在掺镱离子浓度不变的情况下,915 nm 泵浦时所需增益光纤的长度是 976 nm 泵浦时的 3 倍,导致其他非线性阈值降低。

(3)改变泵浦光注入方向

改变泵浦光注入的方向,采用后向泵浦或双向泵浦,可以改变光纤中的泵浦功率分布,增强增益饱和效应,提升模式不稳定阈值。2016 年,麻省理工学院的研究人员采用双端泵浦,将模式不稳定阈值提高了约 2 倍,获得了 2.6 kW 可光束合成的无模式不稳定线宽单模激光^[93]。然而,对于纤芯包层比较大的光纤^[104],本方法阈值提升能力削弱。

(4)增加注入信号功率

增加注入放大器信号光的功率,也可以增强增益饱和效应,提高模式不稳定阈值。然而,随着注入信号光功率增加,系统的放大倍数降低,也会导致其他非线性效应阈值降低。对于空间结构的系统,随着注入信号光功率提升,信号光的耦合处理困难,导致系统的稳定性可能下降^[105]。

(5)同带泵浦

采用同带泵浦方案,泵浦吸收系数减小,增益饱和效应增强,同时量子亏损也减小,因此,采用同带泵浦可以大幅提高模式不稳定阈值。然而,同带泵浦时,光纤对 1018 nm 处泵浦光的吸收远小于传统泵浦波长,增益光纤长度大大增加,导致同带泵浦的输出功率会受限于受激拉曼散射等非线性效应^[106]。

(6)改变信号波长

当放大器工作在 1030 nm 附近时,量子亏损减小,同时,信号光发射截面最大,导致上能级反转粒子数小,增益饱和效应增强。因此,当放大器工作在 1030 nm 附近时,模式不稳定阈值可以大幅提高,1030 nm 处的阈值是 1070 nm 处阈值的 3.3 倍。2016 年,IPG 光子公司的研究人员在 1032 nm 信号波长处获得了泵浦受限的 1.8 kW 的单模窄线宽激光^[107]。然而,1030 nm 附近放大时,拉曼光正好在镱离子的增益带宽内,SRS 效应强,需要抑制 SRS^[108]。

4.2.2 减少光纤热源

暗化效应会导致光纤中产热大幅增加、模式不稳定阈值下降,因此,通过抑制暗化,可以提高模式不稳定阈值。丹麦科技大学^[109]、耶拿大学^[110]、华中科技大学研究人员^[111]均通过抑制暗化效应,有效提高了模式不稳定阈值。

4.2.3 增强光纤热光性能

光纤激光模式不稳定是由二氧化硅材料的热光特性导致的,因此,可以通过优化光纤材料组分降低热光系数或采用具有良好热导率的新材料制造光纤,抑制模式不稳定^[4, 112-113]。尽管材料优化可以从根本上解决模式不稳定等非线性效应,但是基于材料优化的高功率光纤离实用化还有较长距离。

5 总结与展望

模式不稳定现象是高功率激光领域废热影响的直接表现,在任意波长、任意构型高功率光纤激光器中均难以避免。梳理 10 年来研究人员对模式不稳定的研究,模式不稳定的研究尚有进一步完善的空间。

(1)虽然近年来光纤振荡器的输出功率也有了大幅提升^[114-116],然而,模式不稳定的理论研究主要针对掺镱光纤激光放大器,振荡器的研究较少,振荡器模式不稳定的理论研究滞后于放大器模式不稳定的研究。

(2)目前开展的模式不稳定研究主要集中在传统激光二极管/同带泵浦掺镱光纤激光领域,然而增益竞争光纤放大器^[117]、其他稀土离子掺杂(铥、钬等)光纤放大器^[118]、拉曼光纤放大器^[119]、镱离子-拉曼混合泵浦光纤放大器^[75]等作为实现高功率光纤激光的方案,光纤中的产热机制与掺镱光纤放大器不同,必然导致模式不稳定特性也不同,因此,需要单独建立理论模型开展理论研究。

(3)模式不稳定现象特指能量会在不同模式之间发生动态耦合的物理现象,而国防科技大学的研究人员^[120]和美国光学引擎股份有限公司^[77]的研究人员从实验上观察到能量从基模单向耦合到高阶模、无动态的能量耦合的新物理现象。新物理现象也具有阈值性,且阈值与传统模式不稳定的阈值基本一致,俄罗斯研究人员也观察到了类似现象^[70]。目前,仅美国空军学院的研究人员对前述新现象开展了理论研究^[77]。

(4)对于掺镱光纤放大器,线宽对于模式不稳定阈值影响的理论和实验研究相对较少,高功率激光系统中噪声影响研究不够系统,导致理论和实验结果呈现出看似矛盾的结论^[121-122],而且端面返回光对模式不稳定的影响更未见诸报道。

(5)单模到多模、相干到非相干的中间态激光器模式不稳定现象研究较少,而中间态光纤激光模式不稳定现象研究有助于进一步解释模式不稳定初始频移的起源,对于模式不稳定现有相移争议具有重要意义。

基于目前模式不稳定研究特征的分析,下一步将开展不同类型光纤激光模式不稳定研究,建立相应的理论模型开展预先研究,为高功率光纤激光发展方向提供参考,同时利用已有理论解决新物理现象,继续深入探索抑制模式不稳定的方案,在继续优化光纤结构进行光纤模式控制的同时重点开展光纤材料组分的优化,增强光纤本身的热光特性、降低废热影响或将废热高效导出光纤,从根本上抑制模式不稳定现象,支撑高功率光纤获得更高亮度激光输出。

参考文献:

- [1] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers[J]. *J Appl Phys*, 1961, 32: 36-39.
- [2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(11): 63-92.
- [3] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, et al. The future is fibre accelerators[J]. *Nat Photonics*, 2013, 7: 258-261.
- [4] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nat Photonics*, 2013, 7: 861-867.
- [5] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2014, 20(11): 219-241.
- [6] Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications[J]. *Appl Opt*, 2014, 53: 6554-6568.
- [7] 杨昌盛, 徐善辉, 周军, 等. 大功率光纤激光材料与器件关键技术研究进展[J]. *中国科学: 技术科学*, 2017, 47: 1038-1048. (Yang Changsheng, Xu Shanhuai, Zhou Jun, et al. Research advance on the key technology of high-power fiber laser materials and components[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47: 1038-1048)
- [8] Liu Z J, Jin X X, Su R T, et al. Development status of high power fiber lasers and their coherent beam combination[J]. *Science China: Information Science*, 2019, 62: 041301.
- [9] Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology[C]//Proc 5th Int Workshop Fiber Lasers. 2009.
- [10] Eidam T, Hanf S, Seise E, et al. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power[J]. *Opt Lett*, 2010, 35: 94-96.
- [11] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//Proc Conf Lasers Electro-Opt. 2013: AF2J.1.
- [12] 林宏兔, 唐选, 李成钰, 等. 国产单纤激光系统获得10.6 kW激光输出[J]. *中国激光*, 2018, 45: 0315001. (Lin Honghuan, Tang Xuan, Li Chengyu, et al. 10.6 kW laser from totally-domestic fiber laser systems[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2018, 45: 0315001)
- [13] 林傲祥, 湛欢, 彭昆, 等. 国产复合功能光纤实现10 kW激光输出[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 060101. (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: 060101)

- [14] 高聪, 代江云, 李峰云, 等. 自研万瓦级同带泵浦掺镱石英玻璃光纤[J]. *中国激光*, 2020, 47: 0315001. (Gao Cong, Dai Jiangyun, Li Fengyun, et al. Homemade 10-kW ytterbium-doped aluminophosphosilicate fiber for tandem pumping[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2020, 47: 0315001)
- [15] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率全国产化10 kW光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39: 0336001. (Chen Xiaolong, Lou Fengguang, He Yu, et al. Home-made 10-kW fiber laser with high efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39: 0336001)
- [16] Fang Q, Li J, Shi W, et al. 5 kW near-diffraction-limited and 8 kW high-brightness monolithic continuous wave fiber lasers directly pumped by laser diodes[J]. *IEEE Photonics J*, 2017, 9: 1506107.
- [17] Möller F, Krämer R, Matzdorf C, et al. Multi-kW performance analysis of Yb-doped monolithic single-mode amplifier and oscillator setup[C]//Proc of SPIE. 2019: 108970D.
- [18] Ye Y, Xi X, Shi C, et al. Experimental study of 5 kW high stability monolithic fiber laser oscillator with or without external feedback[J]. *IEEE Photonics J*, 2019, 11: 1503508.
- [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]. *Opt Express*, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [20] Otto H J, Stutzki F, Jansen F, et al. Temporal dynamics of mode-instabilities in high power fiber lasers and amplifiers[J]. *Opt Express*, 2012, 20: 15710-15722.
- [21] Stutzki F, Otto H, Jansen F, et al. High-speed modal decomposition of mode instabilities in high-power fiber lasers[J]. *Opt Lett*, 2011, 36: 4572-4574.
- [22] Tao R M, Ma P F, Wang X L, et al. Study of mode instabilities in high power fiber amplifiers by detecting scattering light[C]//International Photonics and OptoElectronics Meetings. 2014.
- [23] 陶汝茂, 周朴, 肖虎, 等. 高功率光纤激光中模式不稳定性现象研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51: 020001. (Tao Rumao, Zhou Pu, Xiao Hu, et al. Progress of study on mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 020001)
- [24] 史尘, 陶汝茂, 王小林, 等. 光纤激光模式不稳定的新现象与新进展[J]. *中国激光*, 2017, 44: 0201004. (Shi Chen, Tao Rumao, Wang Xiaolin, et al. New progress and phenomena of modal instability in fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0201004)
- [25] 陶汝茂, 周朴, 王小林, 等. 高功率全光纤结构主振荡功率放大器中模式不稳定现象的实验研究[J]. *物理学报*, 2014, 63: 085202. (Tao Rumao, Zhou Pu, Wang Xiaolin, et al. Experimental study on mode instability in high power all-fiber master oscillator power amplifier fiber lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 085202)
- [26] Tao R, Ma P, Wang X, et al. 1.4 kW all-fiber narrow-linewidth polarization-maintained fiber amplifier[C]//The 20th International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications. 2014.
- [27] 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: 045504.
- [28] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW[J]. *Opt Lett*, 2011, 36: 3118-3120.
- [29] Jansen F, Stutzki F, Otto H, et al. High-power thermally guiding index-antiguinding-core fibers[J]. *Opt Lett*, 2013, 38: 510-512.
- [30] Yang B L, Zhang H W, Shi C, et al. 3.05 kW monolithic fiber laser oscillator with simultaneous optimizations of stimulated Raman scattering and transverse mode instability[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20: 025802.
- [31] Malleville M, Benoît A, Dauliat R, et al. Experimental investigation of the transverse modal instabilities onset in high power fully-aperiodic-large-pitch fiber lasers[C]//Proc of SPIE. 2018: 1051206.
- [32] Scarnera V, Ghiringhelli F, Malinowski A, et al. Modal instabilities in high power fiber laser oscillators[J]. *Opt Express*, 2019, 27: 4386-4403.
- [33] Roohforouz A, Chenar R, Azizi S, et al. Effect of pumping configuration on the transverse mode instability power threshold in a 3.02 kW fiber laser oscillator[C]//OSA Laser Congress. 2019.
- [34] Chen H, Cao J, Huang Z, et al. Experimental investigations on TMI and IM-FWM in distributed side-pumped fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics J*, 2020, 12: 1502413.
- [35] Jauregui C, Eidam T, Limpert J, et al. Impact of modal interference on the beam quality of high-power fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2011, 19: 3258-3271.
- [36] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [37] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. Thermally induced mode coupling in rare-earth doped fiber amplifiers[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(12): 2382-2384.
- [38] Jauregui C, Eidam T, Otto H J, et al. Physical origin of mode instabilities in high-power fiber laser systems[J]. *Opt Express*, 2012, 20(12): 12912-12925.
- [39] Ward B, Robin C, Dajani I. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2012, 20(10): 11407-11422.
- [40] Dong L. Stimulated thermal Rayleigh scattering in optical fibers[J]. *Opt Express*, 2013, 21(3): 2642-2656.
- [41] Hu I N, Zhu C, Zhang C, et al. Analytical time-dependent theory of thermally-induced modal instabilities in high power fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2013: 860109.
- [42] Jauregui C, Eidam T, Otto H J, et al. Temperature-induced index gratings and their impact on mode instabilities in high-power fiber laser systems[J]. *Opt Express*, 2012, 21(1): 440-451.
- [43] Chi M, Huignard J P, Petersen P M. A general theory of two-wave mixing in nonlinear media[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(8): 1578-1584.
- [44] Smith A V, Smith J J. Influence of pump and seed modulation on the mode instability thresholds of fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2012, 20(22): 24545-24558.
- [45] Smith A V, Smith J J. Spontaneous Rayleigh seed for stimulated Rayleigh scattering in high power fiber amplifiers[J]. *IEEE Photonics J*, 2013, 5: 7100807.
- [46] Smith A V, Smith J J. Review of models of mode instability in fiber amplifiers[EB/OL]. <http://as-photonics.com>.

- [47] Ward B. Numerical analysis of modal instability onset in fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2014: 89611U.
- [48] Naderi S, Dajani I, Grosek J, et al. Theoretical treatment of modal instability in high power cladding-pumped Raman amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2015: 93442X.
- [49] Ward B. Finite element steady periodic beam propagation analysis of mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2018, 26: 16875-16883.
- [50] Smith A V, Smith J J. Steady-periodic method for modeling mode instability in fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2013, 21(3): 2606-2623.
- [51] Naderi S, Dajani I, Madden T, et al. Investigations of modal instabilities in fiber amplifiers through detailed numerical simulations[J]. *Opt Express*, 2013, 21(13): 16111-16129.
- [52] Eznaveh Z S, Lopez-Galmiche G, Antonio-Lopez E, et al. Bi-directional pump configuration for increasing thermal modal instabilities threshold in high power fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2015: 93442G.
- [53] Xia N, Yoo S. Mode instability in ytterbium-doped non-circular fibers[J]. *Opt Express*, 2017, 25: 13230-13251.
- [54] Wang Y, Liu Q, Ma Y, et al. Research of the mode instability threshold in high power double cladding Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Ann Phys*, 2017: 1600398.
- [55] Zhu S, Li J, Li L, et al. Mode instabilities in Yb: YAG crystalline fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2019, 27: 35065-35078.
- [56] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2013, 21(2): 1944-1971.
- [57] Hansen K R, Lægsgaard J. Impact of gain saturation on the mode instability threshold in high-power fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2014, 22(9): 11267-11278.
- [58] Mermelstein M. Laser linewidth dependence to the transverse mode instability (TMI) nonlinear gain in kW-class fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2018: 1051221.
- [59] Jauregui C, Otto H-J, Stutzki F, et al. Simplified modelling the mode instability threshold of high power fiber amplifiers in the presence of photodarkening[J]. *Opt Express*, 2015, 23: 20203-20218.
- [60] Tao R, Ma P, Wang X, Zhou P, et al. 1.3 kW monolithic linearly polarized single-mode master oscillator power amplifier and strategies for mitigating mode instabilities[J]. *Photonics Research*, 2015, 3: 86-93.
- [61] Kong L, Leng J, Zhou P, et al. Numerical modeling of the thermally induced core laser leakage in high power co-pumped ytterbium doped fiber amplifier[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e25.
- [62] Li Z, Huang Z, Xiang X, et al. Experimental demonstration of transverse mode instability enhancement by a counter-pumped scheme in a 2 kW all-fiberized laser[J]. *Photonics Research*, 2017, 5: 77-81.
- [63] Zervas M. Transverse mode instability analysis in fibre amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2017: 100830M.
- [64] Gao W, Zhao B, Fan W, et al. Instability transverse mode phase transition of fiber oscillator for extreme power lasers[J]. *Opt Express*, 2019, 27: 22393-22407.
- [65] Smith A V, Smith J J. Mode instability thresholds of fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2013: 860108.
- [66] Laurila M, Jørgensen M M, Hansen K R, et al. Distributed mode filtering rod fiber amplifier delivering 292 W with improved mode stability[J]. *Opt Express*, 2012, 20(5): 5742-5753.
- [67] Tao R, Ma P, Wang X, et al. Study of wavelength dependence of mode instability based on a semi-analytical model[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2015, 51: 1600106.
- [68] Filippov V, Ustimchik V, Chamorovskiy Y, et al. Impact of axial profile of the gain medium on the mode instability in lasers: regular versus tapered fibers[C]//Cleo/europe-ecqec P Cj-105 I P Cj. 2015.
- [69] Stihler C, Otto H-J, Jauregui C, et al. Experimental investigation of transverse mode instabilities in a double-pass Yb-doped rod-type fiber amplifier[C]//Proc of SPIE. 2017: 100830R.
- [70] Bobkov K, Bubnov M, Aleshkina S, et al. Long-term mode shape degradation in large mode area Yb-doped pulsed fiber amplifiers[J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14: 015102.
- [71] Lupi J, Johansen M, Michieletto M, et al. Static and dynamic mode coupling in double-pass rod-type fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2018, 43(22): 5535-5538.
- [72] Chen Y, Xu H, Xing Y, et al. Impact of gamma-ray radiation-induced photodarkening on mode instability degradation of an ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2018, 26: 20430-20441.
- [73] Gaida C, Gebhardt C, Heuermann T, et al. Observation of transverse-mode instabilities in a thulium-doped fiber amplifier[C]//Proc of SPIE. 2019: 1089702.
- [74] Distler V, Möller F, Strecker M, et al. High power narrow-linewidth Raman amplifier and its limitation[C]//Proc of SPIE. 2020: 1126005.
- [75] Zhang H, Xiao H, Wang X, et al. Mode dynamics in high power Yb-Raman fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(13): 3394-3397.
- [76] Lægsgaard J. Static thermo-optic instability in double-pass fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2016, 24: 13429-13443.
- [77] Ward B. Theory and modeling of photodarkening-induced quasi static degradation in fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2016, 24: 3488-3501.
- [78] Smith A V, Smith J J. Mode instability thresholds for Tm-doped fiber amplifiers pumped at 790 nm[J]. *Opt Express*, 2016, 24: 975-992.
- [79] Shi C, Wang X, Zhang H, et al. Simulation investigation of impact factors in photodarkening-induced beam degradation in fiber amplifiers[J]. *Laser Phys*, 2017, 27: 105102.
- [80] 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 J Sel Top Quant Electron*, 2018, 24: 0903319.
- [81] Tao R, Ma P, Wang X, et al. Study of dopant concentrations on thermally induced mode instability in high-power fiber amplifiers[J]. *Laser Phys*, 2016, 26:

- 065103.
- [82] Ward B. Accurate modeling of rod-type photonic crystal fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2015: 97280F.
- [83] Xia N. Investigation of transverse mode instability suppression in large mode area fibre[D]. Singapore: Nanyang Technological University Library. 2019.
- [84] Tao R, Wang X, Zhou P, et al. Seed power dependence of mode instabilities in high-power fiber amplifiers[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19: 065202.
- [85] Karow M, Tünnermann H, Neumann J, 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: 4242-4244.
- [86] Chu Q, Tao R, Li Chen, et al. Experimental study of the influence of mode excitation on mode instability in high power fiber amplifier[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 9396.
- [87] Zhang F, Xu H, Xing Y, et al. Bending diameter dependence of mode instabilities in multimode fiber amplifier[J]. *Laser Phys Lett*, 2019, 16: 035104.
- [88] Tao R, Ma P, Wang X, et al. A novel theoretical model for mode instability in high power fiber lasers[C]//Advanced Solid State Lasers. 2014: AM5A20.
- [89] 陶汝茂. 高功率窄线宽近衍射极限光纤激光放大器热致模式不稳定研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015. (Tao Rumao. Study of thermal-induced modal instabilities in high power narrow-linewidth fiber amplifiers with near diffraction-limited beam quality[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2015)
- [90] Stihler C, Jauregui C, Kholafif S, et al. The sensitivity of the mode instability threshold to different types of intensity noise[C]//Proc of SPIE. 2020, 11260: 1126018.
- [91] Tao R, Liu Y, Xie L, et al. Static and dynamic mode evolution behavior in high power distributed side-coupled cladding-pumped fiber amplifiers[J]. submitted.
- [92] Tao R, Ma P, Wang X, et al. Influence of core NA on thermal-induced mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. *Laser Phys Lett*, 2015, 12: 085101.
- [93] Yu C, Shatrovov O, Fan T, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2016, 41: 5202-5205.
- [94] Tao R, Ma P, Wang X, et al. Comparison of the threshold of thermal-induced mode instabilities in polarization-maintaining and non-polarization-maintaining active fibers[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18: 065501.
- [95] Goodno G D, McNaught S, Thielen P, et al. Polarization control with mode stability: US8922877B1 [P]. 2014-XX-XX.
- [96] Lei M, Qi Y, Liu C, et al. Mode controlling study on narrow-linewidth and high power all-fiber amplifier[C]//Proc of SPIE. 2015, 9543: 95431L.
- [97] Nicholson J, Fini J, Yablon A, et al. Demonstration of bend-induced nonlinearities in large-mode-area fibers[J]. *Opt Lett*, 2007, 32: 2562-2564.
- [98] Li M J, Chen X, Liu A, et al. Limit of effective area for single-mode operation in step-index large mode area laser fibers[J]. *IEEE J Lightwave Tech*, 2009, 27: 3010-3016.
- [99] Walorny M, Abramczyk J, Jacobson N, et al. Mechanical reliability of double clad fibers in typical fiber laser deployment conditions[C]//Proc of SPIE. 2016: 97283A.
- [100] Beier F, Möller F, Sattler B, et al. Experimental investigations on the TMI thresholds of low-NA Yb-doped single mode fibers[J]. *Opt Lett*, 2018, 43: 1291-1294.
- [101] Hansen K, Alkeskjold T, Broeng J, et al. Thermo-optical effects in high-power Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2011, 19: 23965-23980.
- [102] Rosales-Garcia A, Tobioka H, Abedin K, et al. 2.1 kW single mode continuous wave monolithic fiber laser[C]//Proc of SPIE. 2015: 93441G.
- [103] Kanskar M, Zhang J, Koponen J, et al. Narrowband transverse-modal-instability (TMI)-free Yb-doped fiber amplifiers for directed energy application[C]//Proc of SPIE. 2018: 105120F.
- [104] Tao R, Ma P, Wang X, et al. Theoretical study of pump power distribution on modal instabilities in high power fiber amplifiers[J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14: 025002.
- [105] HansJürgen Otto, Jauregui C, Stutzki F, et al. Dependence of mode instabilities on the extracted power of fiber laser systems[C]//Advanced Solid State Lasers. 2013.
- [106] Xiao H, Leng J, Zhang H, et al. High-power 1018 nm ytterbium-doped fiber laser and its application in tandem pump[J]. *Appl Opt*, 2015, 54: 8166-8169.
- [107] Yagodkin R, Platonov N, Yusim A, et al. >1.5 kW narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier with 40 nm bandwidth[C]//Proc of SPIE. 2015: 972807.
- [108] Platonov N, Shkurikhin O, Fomin V, et al. Highly efficient kW level single-mode ytterbium fiber lasers in all-fiber format with diffraction-limited beam at wavelengths in 1000-1030 nm spectral range[C]//Proc of SPIE. 2020: 1126003.
- [109] Johansen M M, Laurila M, Maack M D, et al. Frequency resolved transverse mode instability in rod fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2013, 21: 21847-21856.
- [110] Otto H-J, Modsching N, Jauregui C, et al. Impact of photodarkening on the mode instability threshold[J]. *Opt Express*, 2015, 23: 15265-15277.
- [111] Chen Y, Xu H, Xing Y, et al. Mitigation of mode instability in laser oscillators based on deuterium loading[J]. *Opt Express*, 2019, 27: 25964-25973.
- [112] Ballato J, Dragic P. Materials development for next generation optical fiber[J]. *Materials*, 2014, 7: 4411-4430.
- [113] 陈瑰, 侯超奇, 郭海涛, 等. 用于高功率系统的掺铽石英光纤研究进展及发展趋势[J]. *光子学报*, 2019, 48: 1148012. (Chen Gui, Hou Chaoqi, Guo Haitao, et al. Ytterbium-doped silica fiber for high power system: a review of research progress and development trend[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48: 1148012)
- [114] 杨保来, 王小林, 叶云, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破6 kW[J]. *中国激光*, 2020, 47: 0116001. (Yang Baolai, Wang Xiaolin, Ye Yun, et al. Laser power from all-fiber oscillators breaks through 6 kW[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47: 0116001)
- [115] Möller F, Krämer R, Matzdorf C, et al. Multi-kW performance analysis of Yb-doped monolithic single-mode amplifier and oscillator setup[C]//Proc of SPIE. 2019: 108970D.

- [116] 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: 1126022.
- [117] Möller F, Distler V, Schreiber T, et al. Manipulating the heat load distribution by laser gain competition in TMI-limited fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2020: 1126019.
- [118] Gaida C, Gebhardt M, Heuermann T, et al. Observation of transverse-mode instabilities in a thulium-doped fiber amplifier[C]//Proc of SPIE. 2019: 1089702.
- [119] Distler V, Möller F, Strecker M, et al. High power narrow-linewidth Raman amplifier and its limitation[C]//Proc of SPIE. 2020: 1126005.
- [120] 于海龙, 王小林, 张汉伟, 等. 300 W线偏振飞秒全光纤啁啾脉冲放大系统[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 050101. (Yu Hailong, Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, et al. 300 W linearly polarized femtosecond all-fiber chirped pulse amplification system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 050101)
- [121] Stihler C, Jauregui C, Kholaf S, et al. The sensitivity of the mode instability threshold to different types of intensity noise[C]//Proc of SPIE. 2020: 1126018.
- [122] Smith A V, Smith J J. Overview of a steady-periodic model of modal instability in fiber amplifiers[J]. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2014, 20(5): 472-483.

《强激光与粒子束》连续6次被评为“RCCSE中国权威学术期刊”

《中国学术期刊评价研究报告（第6版）》于2020年10月22日正式发布。本次评价工作包括中文学术期刊的认定和中文学术期刊的评价两个部分，其中共认定中文学术期刊6390种，评价得到权威学术期刊(A⁺等级)366种，核心期刊(A和A⁻)1693种，B⁺等级(准核心期刊)1914种，B等级(一般期刊)1847种，C等级(较差期刊)570种。《强激光与粒子束》在核科学技术领域的14种期刊中排名第1位，被评为“RCCSE中国权威学术期刊(A⁺)”。这是本刊继2009年(第1版)、2011年(第2版)、2013年(第3版)、2015年(第4版)、2017年(第5版)后，连续第6版入选A⁺级期刊。



《强激光与粒子束》始终不忘初心，坚持科学家办刊理念，紧跟领域热点和前沿，组织策划发表强激光与粒子束技术领域的高水平论文，学术水平和办刊质量逐步提高，在此衷心感谢各位编委、专家和作者的大力支持，编辑部将继续坚持高标准办刊，努力将期刊打造成国防高技术领域卓越中文期刊！

RCCSE 期刊:

RCCSE《中国学术期刊评价研究报告》是国内主流的七大大期刊评价体系之一，现已有2000多家出版机构和800多个科研管理部门将《报告》的评价结果作为办刊质量评估和科研成果统计的重要参考工具。《报告》将期刊分学科、按各期刊的综合评价得分排序并依次分为6个等级：

- ① A⁺等为权威期刊，即排在最前面的5%的期刊；
- ② A等和A⁻等为核心期刊，A占各学科期刊总数的15%，即排在5%–20%的期刊；A⁻占各学科期刊总数的10%，即排在20%–30%的期刊；
- ③ B⁺等为准核心期刊，占期刊总数的30%，即排在30%–60%的期刊；
- ④ B等为一般期刊，占总数的30%，即排在60%–90%的期刊；
- ⑤ C等为较差期刊，占总数的10%，即排在90%–100%的期刊。

《强激光与粒子束》编辑部
2020年11月