

光纤激光模式不稳定的新现象与新进展

史 尘, 陶汝茂, 王小林*, 周 朴, 许晓军, 陆启生

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 首先介绍了光纤激光中传统的热致动态模式不稳定的研究现状, 然后重点介绍了 2016 年以来理论预测的准静态模式不稳定; 接着, 对非热致模式不稳定的研究现状进行介绍, 包括电致伸缩模式不稳定和非线性效应与模式不稳定之间的关系。最后, 对模式不稳定对高功率光纤放大器的功率限制进行了总结和分析。

关键词 激光光学; 模式不稳定; 热效应; 电致伸缩; 非线性效应

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201004

New Progress and Phenomena of Modal Instability in Fiber Lasers

Shi Chen, Tao Rumao, Wang Xiaolin, Zhou Pu, Xu Xiaojun, Lu Qisheng

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

Abstract The research status of traditional dynamic thermally-induced modal instability in fiber lasers is introduced, and the theoretical predictions of quasi-static modal instability since 2016 are also introduced. Then, the status of non-thermally-induced modal instability, including electrostriction effects and nonlinear effects in modal instability, is introduced. Finally, the power scaling limit of modal instability on high power fiber amplifier is summarized and analyzed.

Key words laser optics; modal instability; thermal effects; electrostriction effects; nonlinear effects

OCIS codes 140.3510; 190.3100; 120.6810; 190.2055; 190.4370

1 引 言

光纤激光器因为具有热管理方便、光束质量好、体积小、效率高和稳定性好等优点而越来越多地被应用到工业加工、先进制造和国防工业等领域^[1-2]。随着大模场掺杂光纤工艺和包层抽运技术以及高亮度发光二极管(LD)的发展, 原本限制光纤激光功率提升的非线性效应, 如受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)和自相位调制(SPM)等得到有效抑制, 使得光纤激光的单纤单模输出功率得到迅速提升, 其中掺镱单纤单模的输出功率已经达到 20 kW 量级^[3-4]。但是随着光纤激光功率的进一步提升, 在常规光纤放大器芯径(纤芯直径小于等于 50 μm) 范围以内, 在较短的光纤长度(5~20 m)下, 模式不稳定(MI)已经成为限制单纤单模光纤激光器功率提升的主要因素^[5-6]。

根据产生的机理, 模式不稳定可以分为热致模式不稳定和电致模式不稳定。热致模式不稳定是由量子亏损等热效应引起的热致折射率光栅导致的模式耦合, 是目前研究较为广泛的一类模式不稳定现象。电致模式不稳定是由前后向光场干涉的电致折射率伸缩效应导致的模式耦合。尽管目前电致模式不稳定鲜有实验报道, 但是在存在后向回光(比如 SBS)的单频和窄线宽放大器中, 可能会成为限制激光功率的重要因素。根据模式耦合和变化情况, 模式不稳定可以分为动态模式不稳定(DMI)和准静态模式(QSMI)不稳定两类。

收稿日期: 2016-09-18; **收到修改稿日期:** 2016-10-08

作者简介: 史 尘(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: bigbryant@nudt.edu.cn

导师简介: 陆启生(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

* **通信联系人.** E-mail: chinawxllin@163.com

动态模式不稳定指的是当光纤激光的抽运功率超过一定的阈值之后,输出激光在基模与高阶模式(主要是 LP_{11} 模式)之间周期性动态转化的现象。准静态模式不稳定中,当光纤激光的抽运功率超过一定的阈值或者工作超过一定时间后,输出激光会从基模单向耦合至高阶模式,从而造成输出光束质量的退化。2010年德国耶拿大学的研究人员首次公开报道光纤激光器中的动态模式不稳定现象^[7],引起了世界各国研究人员的浓厚兴趣,成为高功率光纤激光领域一个新的研究方向与热点。静态模式不稳定,直到2016年1月的理论预测后,才得到人们的关注。一般而言,热致和电致模式不稳定可以是动态、也可以是静态的,但是目前实验观察到的静态模式不稳定主要是由于热效应。

目前国际上对模式不稳定的研究主要集中在热致动态模式不稳定方面,对于准静态模式不稳定、电致模式不稳定、非线性效应与模式不稳定的关系方面关注不多。考虑到在单频和窄线宽放大器中,电致模式不稳定、非线性效应与模式不稳定之间的耦合都会影响放大器输出功率,本文重点对2016年以来理论预测的准静态模式不稳定、电致伸缩模式不稳定、非线性效应与模式不稳定之间的关系进行介绍,并对模式不稳定对高功率光纤放大器的功率限制进行了简单的总结和分析。

2 动态模式不稳定

动态模式不稳定指输出功率超过某个阈值后,光纤激光的输出模式由稳定的基模变为基模和高阶模(HOM)相对成分随时间迅速变化的非稳态模式^[8]。其光斑变化过程如图1所示^[9]。

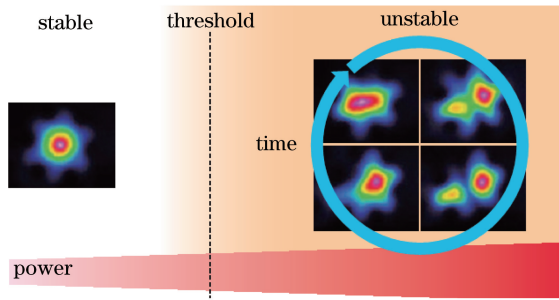


图1 动态模式不稳定光斑随输出功率变化过程

Fig. 1 Illustration of beam variation of DMI procedure with output power

各国研究人员针对动态模式不稳定进行了大量的实验和理论研究。目前,参与到热致动态模式不稳定研究的单位主要有德国的耶拿大学,美国的空军实验室、克莱姆森大学、密歇根大学、AS光子公司,丹麦科技大学以及中国的国防科技大学。

2.1 物理根源和物理表征

研究人员认为光纤中模式不稳定的物理根源在于光纤中的热效应^[8,10-14]。目前在高功率光纤激光中大模场面积(LMA)光纤被广泛使用,而LMA光纤的纤芯支持多个模式,当单模信号光注入到LMA光纤中时,即使使用合束器进行模场适配,仍然不可避免地会激发少量的高阶模式,基模和高阶模会在光纤中形成干涉。经过干涉的光场会在光纤中对抽运光周期性提取,从而导致量子亏损产热的周期性分布,形成周期性的温度分布,由于热光效应的存在,最终周期性的温度分布转化为长周期折射率光栅。热致折射率光栅满足相位匹配条件,可以实现不同模式之间的能量耦合。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,基模和高阶模之间没有能量耦合。因此,想要产生能量耦合,光纤中的干涉光场与感应的热致折射率光栅必须存在相位差^[11]。Smith A V等^[15-16]认为噪声(量子噪声、自发热瑞利散射、强度噪声)、抽运调制等可以激发频移的高阶模,即信号光的频移假设,导致折射率光栅沿光纤移动而产生相移,所以热致模式不稳定本质上是受激热瑞利散射^[8]。耶拿大学提出相移是由非绝热波导改变引起的^[17];光束无法使自身快速适应迅速变化的波导条件,从而导致干涉光场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,但已建立的理论模型大部分采用频移假设。

大量的实验研究表明,动态模式不稳定具有如下特点^[18]:1) 模式不稳定具有“阈值性”^[19];2) 模式不稳定阈值仅与平均功率有关,与峰值功率无关^[19];3) 模式不稳定与光子暗化有关^[20-22];4) 模式不稳定与纤芯

(模场)直径有关^[23-24];5) 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”^[25];6) 模式不稳定现象具有毫秒量级的生长时间和持续时间^[25];7) 模式不稳定现象仅造成输出光束质量下降,不影响平均输出功率,但是会影响放大器的斜效率^[26-27];8) 当激光的谱线宽度小于特定“阈值”时,模式不稳定阈值与激光的谱线宽度无关,当激光的谱线宽度大于前述“阈值”后,模式不稳定阈值随线宽增加而增大^[28-29]。

2.2 理论模型与抑制手段

基于 2.1 节所述的热致长周期折射率光栅的模式不稳定物理机理,研究人员建立了各种模型来描述光纤激光中的模式不稳定现象。对于频移导致的移动光栅假设,AS 光子公司的 Smith A V 等^[11]、丹麦科技大学的 Hansen 等^[10]、美国克莱姆森大学的 Dong^[30] 以及美国密歇根大学的 Hu^[31] 等、中国国防科技大学的 Tao R M 等^[32] 分别建立了基于纯数值、半解析或全解析的数学模型,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在一定程度上吻合;对于非绝热波导改变的准静态光栅假设,德国耶拿大学的 Jauregui C 等^[17]、美国空军实验室的 Ward B^[33] 等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。

从计算类型区分,上述模型可以分为数值模型与解析模型两类。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,难以反映其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,数值模型还存在计算量大的不足。德国耶拿大学的 Jauregui C 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,但也存在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的不足,而且由于需要将理论计算结果与实际实验结果进行拟合,应用受限。通过采用合理近似,丹麦科技大学、美国克莱姆森大学、中国国防科技大学的研究人员建立了光纤激光模式不稳定的解析模型,获得了一系列解析表达式,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,使理论研究不受有限的计算速度和计算资源的限制,在实际工程中得到应用。基于以上理论分析,目前抑制动态模式不稳定的方案主要是从以下几个方面着手:

1) 增加高阶模式的弯曲损耗^[34]。在 2.1 节的物理根源中提到,长周期热致折射率光栅的成因主要是基模与高阶模式干涉所形成的光场周期性分布。如果能够利用弯曲损耗有效地滤除光纤纤芯中的高阶模式,那么纤芯中将无法形成高对比度的干涉光场,从而抑制了热致折射率光栅的产生,最终提高了模式不稳定的阈值。2015 年,德国耶拿的研究人员利用低数值孔径的光纤(纤芯数值孔径约 0.04)获得了 2.7 kW 的单模光纤激光输出^[35];2016 年,国防科技大学的 Ma P F 等^[36] 利用光纤盘绕滤除高阶模的方式获得了 1.89 kW 线偏振单纤单模激光输出。

2) 部分掺杂与增益裁剪^[37]。在掺杂光纤的纤芯区域限制掺杂来降低高阶模式与掺杂部分的重叠,从而降低高阶模式的增益。其对模式不稳定的抑制原理与增加高阶模弯曲损耗是类似的。所不同的是限制掺杂是从降低增益着手来滤除纤芯中的高阶模式从而提高光纤的模式不稳定阈值。2014 年,美国空军的研究人员采用增益裁剪光纤抑制模式不稳定,获得了 811 W 的单频激光^[38]。

3) 增加增益饱和或降低量子亏损^[39-40]。这两种方案都旨在降低光纤中的热源项,从而降低热致折射率光栅的对比度,提高光纤中的模式不稳定阈值。2015 年,国防科技大学的 Tao R M 等^[41] 通过将抽运光波长由 976 nm 改变至 915 nm,将 20/400 增益光纤中的模式不稳定阈值从 700 W 提升到了 1.2 kW。

在上述的三种方法中,除了增加高阶模弯曲损耗以外,其他两种方法均存在抽运效率下降导致的光纤长度变长的问题。而较长的光纤长度会导致 SRS、SBS、SPM 等非线性效应的阈值降低,从而限制光纤激光的功率提升能力。而从分析中也看到增加高阶模损耗对于模式不稳定的阈值功率提升能力最大,所以在实际设计系统中,需要平衡动态不稳定与非线性效应的性能,从而得到最佳的功率提升性能。

3 准静态模式不稳定

与动态模式不稳定不同,准静态模式不稳定最初并没有在实验上被观察到,而是在 2016 年 2 月和 6 月分别被美国空军实验室的 Ward B^[42] 与丹麦科技大学的 Lægsgaard J^[43] 理论预测。可以说,准静态模式不稳定是刚刚被人们所认识的一种全新机制的模式不稳定现象。

准静态模式不稳定指在较大的时间尺度上,光纤激光的输出功率由基模单向耦合至高阶模式从而造成光束质量退化的准静态非稳态模式不稳定。其物理过程可以由图 2 简单表示。

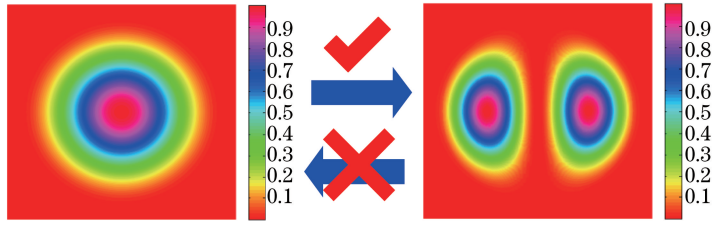


图 2 QSMI 光斑变化过程

Fig. 2 Illustration of beam variation of QSMI procedure

从图 2 中可以看出,QSMI 与 DMI 最大的区别有两点:1) 动态模式不稳定的光功率耦合发生在 ms 的时间尺度,从光纤输出的时域信号看来,DMI 的模式耦合特征频率在 kHz 量级,而 QSMI 是在较大的时间尺度上发生光功率耦合,这个时间通常是分钟甚至十分钟的时间尺度,所以 QSMI 从与动态模式不稳定对比的角度看是静态的;2) QSMI 发生之后其光功率的耦合方向是单向的,也就是说光功率只能从基模向高阶模耦合,而高阶模功率却不会耦合回基模中。

相对于动态模式不稳定,准静态模式不稳定的实验和理论研究均处于起步阶段,本节将着重介绍目前准静态模式不稳定的物理根源与物理过程以及其理论和实验研究。

3.1 QSMI 的起因

目前准静态模式不稳定的起因主要有两个:光子暗化和多程放大。光子暗化所引起的准静态模式不稳定主要发生在单程放大器中,其主要成因是光子暗化所产生的热效应在时间上的缓慢积累特性。相比于量子亏损,光子暗化的产热是在一个较长的时间周期内所进行的热量积累,而且光子暗化本身也会引起纤芯折射率的改变^[44],由此成为基于光子暗化的准静态模式不稳定的原因。图 3 描述了基于光子暗化的 QSMI 的主要物理过程^[42]。

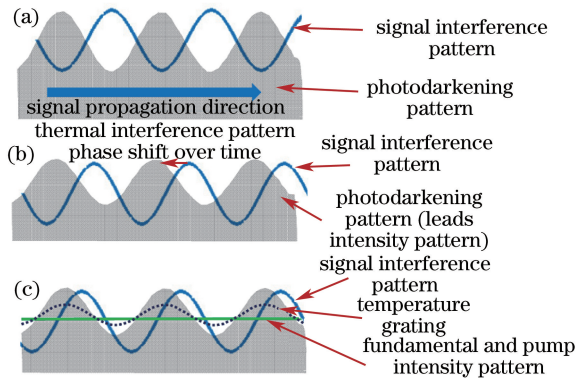


图 3 基于光子暗化的 QSMI 物理过程。(a) 初始状态;(b) 建立状态;(c) 稳定状态

Fig. 3 Physical process of photodarkening-induced QSMI. (a) Initial status; (b) establishing status; (c) stabilizing status

与 DMI 类似,假设种子光在注入放大器增益光纤中的时候会不可避免地激发起少量的高阶模式(LP_{11}),并忽略 DMI 的效果,那么在增益光纤中,基模与少量的高阶模式会发生干涉从而导致光强沿光纤长度方向产生周期性的分布,纤芯中光子暗化效应也会产生周期性的分布,并且由于吸收饱和,光子暗化分布与干涉光场分布存在 π 的相位差,如图 3(a) 所示。由于光子暗化本身在时间上的积累效应,由光场干涉而形成的光子暗化分布会逐渐增强。在这一过程中,由于基模与纤芯的重叠面积要比高阶模式与纤芯的重叠面积大,所以基模所感受到的热致折射率改变会比高阶模感受到的要更大。在光子暗化分布逐渐增强的过程中,由于基模与高阶模所感受的非线性相移不同,其干涉拍长变短,模式之间的干涉条纹向信号光输入端收紧,如图 3(b) 所示。由于光子暗化的缓慢积累效果,光子暗化分布变化不会跟上干涉光场的变化速度,加上由光子暗化分布所形成的折射率光栅与光场干涉之间的 π 相位差,可以将光功率由基模耦合至高阶模。

由于光子暗化所形成的折射率光栅非常微弱,干涉光场的变化十分缓慢,这也是光子暗化所引起的模式耦合发生在较长时间尺度上的原因。

对于振荡器、光纤端面回光等原因所造成的光纤激光中的准静态模式不稳定,可以归因为多程放大所造成的准静态模式不稳定^[43,45]。基于后向光耦合所产生的准静态模式不稳定的典型结构是双程放大器以及光纤激光振荡器。事实上,在双程放大器和振荡器中,准静态模式不稳定和动态模式不稳定往往是相伴相生的。对于 DMI 来说,由于后向光的介入,前后向的基模与高阶模式可以同时发生干涉形成两个长周期折射率光栅,并且前后向的折射率光纤都可以同时对前后向的信号光产生耦合作用,所以在双程放大器和光纤振荡器中的 DMI 要比单程放大器中复杂得多。幸运的是,在多程放大的光纤激光系统中,QSMI 的阈值往往要比 DMI 阈值低^[45],所以在双程放大器中研究 QSMI 成为研究多程光纤激光放大系统中模式不稳定的起点。为了简化问题,将双程放大器中的 QSMI 物理过程描述如下:忽略单程放大器 DMI 中所采用的为了处理光场耦合而引入的频移假设,假设双程放大器中的正反向基模和高阶模式都具有相同的角频率 ω (值得一提的是在 QSMI 中,无论是多程放大还是基于光子暗化,理论建模的时候都抛弃了频移假设),那么原本运动的干涉分布稳定下来,变为了准静态的模式不稳定,前后向信号光的光场干涉所产生的两组热致折射率光栅又使得光场在沿光纤长度变化时候对高阶模式的耦合大大增强,所以大大降低了准静态模式不稳定现象的发生阈值。

3.2 QSMI 的理论研究

研究人员对 DMI 进行研究的时候,发现量子亏损并不是光纤产热的唯一来源,而光子暗化也会对 DMI 的阈值产生影响,降低光子暗化是可能的有效抑制 DMI 的手段之一^[22]。目前对基于光子暗化的 QSMI 的理论建模主要是由美国空军学院的 Ward B 完成的^[42]。首先假设光子暗化产热所形成的热源是对信号光场的吸收造成的,所以热源项就是在信号光强的基础上乘以一个与光子暗化相关的吸收系数,即

$$Q_{PD}(\mathbf{r}) = \alpha_{PD}(\mathbf{r}) I(\mathbf{r}), \quad (1)$$

式中 I 是纤芯中的光强; \mathbf{r} 是位置向量,表征光纤中的位置。 α_{PD} 是光子暗化相关的吸收系数,与上能级粒子数比例相关,其中的关键参数是光子暗化的时间常数与展宽因子;其次将光纤中的光场写为基模与高阶模的干涉形式,那么干涉光场可以用与高阶模式相关的微扰来表示;然后利用干涉光场求取纤芯中的上能级粒子数分布,并将上能级粒子数分布表达成关于干涉光场的微扰形式;最后利用求得的微扰干涉光场与微扰上能级粒子数求取 Q_{PD} 的微扰形式,进而利用热光系数求取不同模式的非线性相移,最终利用耦合模理论求得基模对高阶模式的耦合系数,进而求得耦合功率。在 Ward B 的理论中,采用单程放大器的稳态解作为微扰的稳态形式,由于光子暗化时间常数通常以十分钟为量级,所以在每一时刻都作为稳态处理,最终阶跃折射率光纤的计算结果如图 4 所示^[42]。

从图 4 的计算结果中看到,光功率从基模向高阶模的耦合强度在特定时间的特定位置达到最强,从而使得高阶模式的光功率成份在特定时间达到了最强。Ward B 同时也给出了光子晶体光纤(PCF)的仿真结果,与阶跃折射率光纤类似,只是在 PCF 中,准静态模式不稳定会在更低的阈值功率下发生,同时耦合强度也更大。

丹麦科技大学的 Lægsgaard J 完成了对双程放大器中准静态模式不稳定的理论分析。事实上分析双程放大器与分析不带频移的单程放大器是一致的。首先假设前后向的基模与高阶模的复振幅,并将前后向的

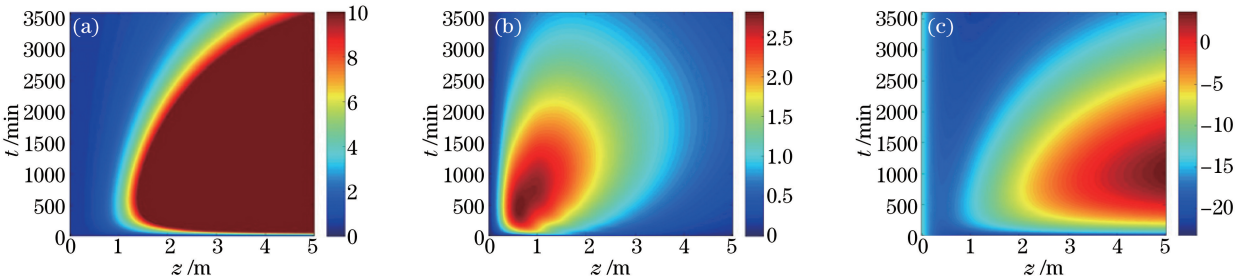


图 4 光子暗化 QSMI 仿真结果。(a)高阶模功率;(b)耦合强度;(c)高阶模与基模功率比例

Fig. 4 Simulation results of photodarkening-induced QSMI. (a) HOM power; (b) coupling strength;

(c) power ratio of HOM and fundamental mode

总光场表示为前后向干涉光场,然后利用干涉光场计算上能级粒子数分布并计算放大器中的热负荷,接着利用热负荷求取光纤中的温度场并利用热光系数转化为热致折射率光栅,最后利用耦合模理论与放大器反射端的边界条件计算出基模与高阶模之间的功率耦合。由于基模与高阶模之间不存在频移,所以初始的信号光注入成分会对双程放大器的准静态模式不稳定阈值有较大的影响。因此,当注入信号光的高阶模式比例增加,准静态模式不稳定的阈值会随之降低。图 5 给出了在高的阶模注入比例时候,输出光斑随着抽运功率的增加而产生的变化^[43]。

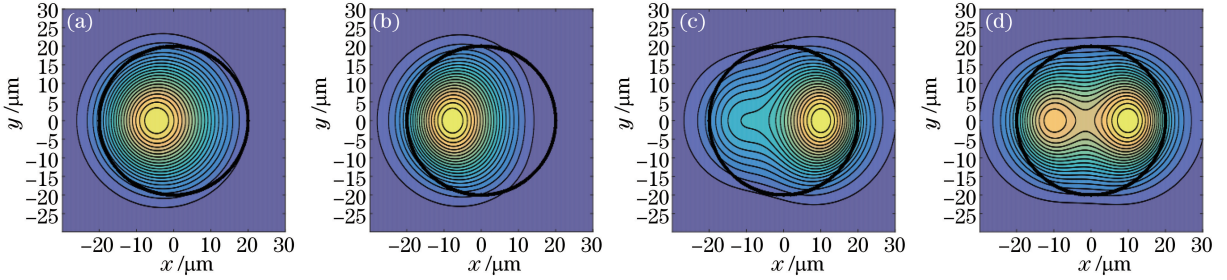


图 5 在高的阶模注入比例下的输出光斑随抽运功率的变化。(a) 40 W;(b) 50 W;(c) 85 W;(d) 90 W

Fig. 5 Output beam profile in high HOM fraction varying with pump power. (a) 40 W; (b) 50 W; (c) 85 W; (d) 90 W

由图 5 可见,输出光斑随着抽运功率的增加而逐渐劣化,显示了光功率由基模向高阶模的耦合,同时也说明了双程放大器中 QSMI 的阈值性特征。这与俄罗斯科学院的研究人员在实验中所观察到的现象吻合^[46]。

3.3 QSMI 实验

与在单程放大器中的 DMI 不同,QSMI 目前处于起步研究阶段,理论和实验上的研究都非常少,欠缺实验观测。2016 年,国防科技大学的 Wang X L 等^[47]在光纤激光振荡器中观察到了准静态模式不稳定现象,实验结构如图 6 所示。

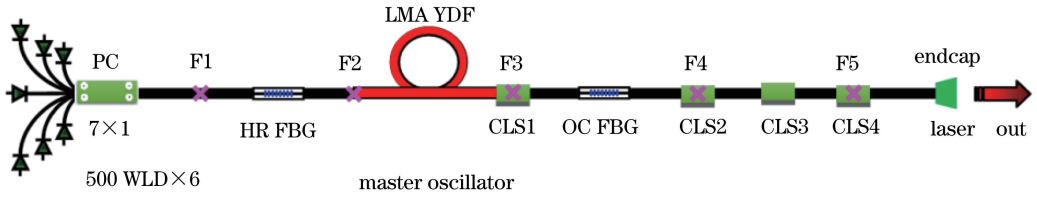


图 6 高功率光纤振荡器中 QSMI 研究实验结构图

Fig. 6 Experimental architecture of QSMI in high power fiber oscillator

实验中利用前向抽运的结构,使用合束器将 6 个波长为 975 nm、功率为 500 W 的 LD 从高反光栅(HR FBG)耦合进谐振腔内,腔内使用一段 20/400 的增益光纤作为增益介质。高反光栅与低反光栅的中心波长均为 1080 nm,且其反射率分别为 99.9%和 8.7%。

图 7(a)展示了在抽运功率提升的时候,前向与后向输出功率的变化曲线。当前向输出功率达到

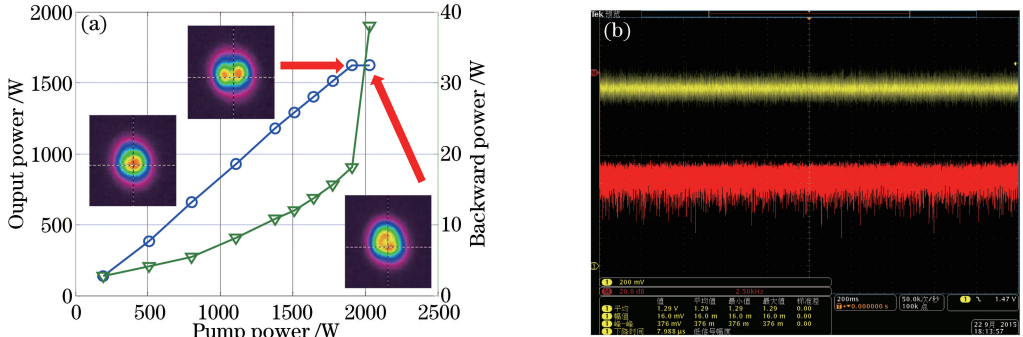


图 7 振荡器模式不稳定实验结果。(a)前后向功率;(b)时域波形及其频谱

Fig. 7 Experimental results of MI in fiber oscillator. (a) Forward and backward power; (b) time-domain wave and its frequency spectra

1.64 kW的时候,前向输出功率发生滞涨,此时采集输出光斑以及输出功率的时域曲线,即图 7(b)。可以发现,输出的光斑以非常慢的速度耦合进 LP_{11} 模式并形成了较为稳定的光斑。同时在时域频谱上并没有发现明显的直流信号之外的成份,充分说明了这是一种不同于传统动态模式不稳定的 MI 现象。这是研究人员在振荡器的实验中首次观察到 QSMI 的公开报道。同时,王小林等还提出利用 915 nm 泵源、采用少模光纤并采用盘绕增加 LP_{11} 模的损耗来提升 QSMI 阈值,由此振荡器中的输出功率被提升至 2.08 kW。

4 模式不稳定中的新现象

在第 2、3 节中所提到的动态以及准静态模式不稳定,其产生的物理根源都是光纤中的热效应(量子亏损、光子暗化)。而事实上,在光纤激光系统中,热致模式不稳定并不是唯一一种可以诱发模式不稳定的物理根源,电致伸缩所形成的电致折射率光栅^[48]可能是存在后向回光的光纤激光系统中产生模式不稳定的另一种主要原因。

4.1 电致伸缩导致的模式不稳定

2016 年,俄罗斯科学院的研究人员 Antipov O 等^[45]报道了在保偏掺镱光纤放大器中对于后向回光与模式不稳定阈值的实验和理论研究^[45-46]。所采用的实验结构如图 8 所示。

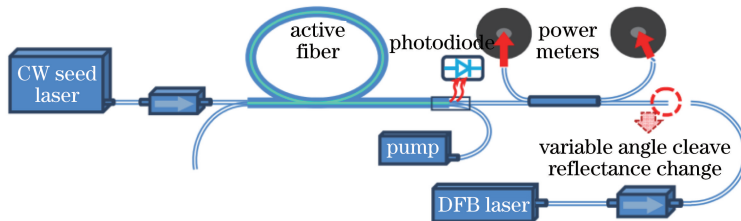


图 8 后向光对模式不稳定的影响实验结构图

Fig. 8 Experimental setup for influence of backward signal on MI

在实验中, Antipov O 等^[45]采用了一段 6m 长的保偏掺镱光纤作为单频种子源的放大器,在输出端接有一个耦合器用来检测前向与后向的输出功率。通过外界的单频光源来对放大器进行后向光注入,进而研究后向光信号强度以及线宽对于模式不稳定阈值的影响。实验结果如图 9。

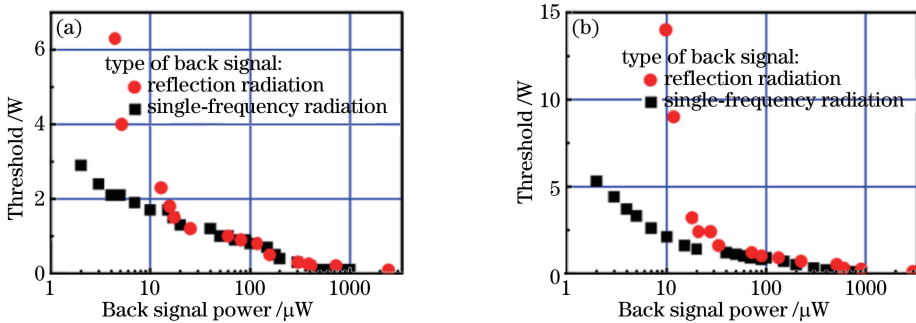


图 9 在不同的种子光线宽下的模式不稳定阈值。(a) 0.14 nm; (b) 0.25 nm

Fig. 9 MI threshold under different linewidths of seed. (a) 0.14 nm; (b) 0.25 nm

图 9 中的黑点表示外加单频后向光的时候的模式不稳定阈值,而红点则表示输出光纤端面反馈所带来后向光的模式不稳定阈值。注意到当后向光由自身反馈光变为外加的单频光源后,模式不稳定的阈值被大大地拉低了。随后 Antipov O 等^[46]通过改变后向反馈的波长发现,当后向单频信号的波长与信号光波长失谐的时候,模式不稳定阈值会得到提升。从实验结果可知,后向外加信号所带来的模式不稳定阈值的降低主要还是来源于正反两个方向的光场干涉所形成的折射率光栅。在之后的理论分析中,俄罗斯研究人员指出,在外加反馈的情况下,光纤内部所形成的长周期折射率光栅主要来自于干涉光场的电致伸缩效应而非热光效应。

4.2 非线性效应与模式不稳定

在光纤激光系统中,模式不稳定和各种限制功率提升的非线性效应往往是同时发生的,它们共同对光纤

中的激光功率提升起着限制的作用。通过前面的分析,可以看到,为了抑制诸如 SRS、SBS、SPM 等非线性效应,常规的方法是增大纤芯面积和使用短光纤,这恰恰会降低模式不稳定的阈值,从这个角度可以说模式不稳定与常规非线性效应的抑制是相生相克的。然而随着模式不稳定新现象的发现以及多程放大中电致伸缩效应导致的模式不稳定的产生,SBS 与模式不稳定的关系变得更加密不可分。

事实上在 2015 和 2014 年,韩国和美国的研究人员就分别报道了在实验中所观察到的与受激布里渊散射相关联的模式不稳定现象^[49-50]。韩国的 Lee K H 等^[49]在报道中指出,在单频脉冲激光放大器中,模式不稳定的阈值与 SBS 阈值是相同的,每当监测到后向功率提升的时候,输出光斑就开始退化。将这一结果与前述俄罗斯研究人员的理论研究^[46]相联系,不难发现,电致伸缩模式不稳定的一个重要条件就是需要一个与前向信号光频率相近的单频后向光,而单频光纤激光中的后向 SBS 散射光事实上就是与信号光频率非常相近的单频后向信号。所以当 SBS 产生之后,就相当于文献^[45]中所外加的后向单频源,由于前后向光场干涉所产生的电致长周期折射率光栅,模式不稳定的阈值被大大降低,从而与 SBS 一同出现。

通过上述分析,可以得出结论:在单频和窄线宽放大器中,非热致模式不稳定现象是与 SBS 相伴相生的,当 SBS 出现之后,模式不稳定就会随之出现,所以在单频和窄线宽放大器中,SBS 仍然是获得功率提升的最大障碍,只有将 SBS 阈值提升至模式不稳定阈值之上才能获得更进一步的功率水平提升。

4.3 光纤振荡器中的模式不稳定实验研究

与单程放大器中的热致动态模式不稳定相比,光纤激光振荡器中的模式不稳定无论从理论上还是在实验上研究进展都较慢,原因是:1) 当前高功率的光纤激光器大多采用主振荡功率放大(MOPA)的方案,对作为种子的光纤激光振荡器的输出功率要求不高,往往达不到模式不稳定发生的功率阈值,因而不会碰到模式不稳定现象;2) 在光纤振荡器中对动态模式不稳定的模型构造和处理都存在较大的难度,由于前后向的光场都存在基模与高阶模以及频移,所形成的热致折射率光栅沿着两个方向同时运动,为模型的简化和处理带来了极大的困难,所以至今都没有可以有效地描述振荡器中模式不稳定现象的理论模型。

在 2014 年,伊朗的研究人员首次报道了在光纤激光振荡器中所观察到的模式不稳定现象^[51]。在搭建的 1078 nm 光纤振荡器中,观察到了模式不稳定所引起的功率滞涨,随即研究了抽运波长、信号带宽和光纤盘绕方式对模式不稳定阈值的影响,最终利用光纤盘绕和抽运波长优化的手段,将光纤振荡器输出功率提高至 500 W。2016 年,国防科技大学的 Yang B L 等^[52]在所搭建的千瓦级的光纤激光振荡器中同样观察到了动态模式不稳定现象,其实验结构如图 10 所示。

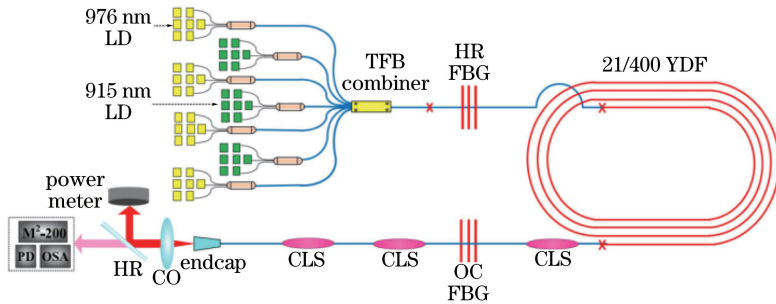


图 10 光纤激光振荡器模式不稳定实验结构图

Fig. 10 Schematic for experiment of MI in fiber laser oscillator

在实验中,采用了单端前向 976 nm 与 915 nm 混合抽运,光纤光栅对的中心波长为 1080 nm,增益光纤为 21/400 的掺镱光纤。采用 976 nm 泵源单独抽运,在输出功率达到 1090 W 的时候发生了模式不稳定,其时域及频域信号如图 11 所示。

由图 11(b)看出振荡器中的动态模式不稳定的特征频率比单程放大器中的低,但是频域的变化与单程放大器中的保持一致,即随着输出功率的增加,时域信号的频域会被展宽,最后趋于“混沌”。通过混合抽运的运用,最终杨保来将振荡器的输出功率提升至 2 kW 并且没有发生动态模式不稳定。

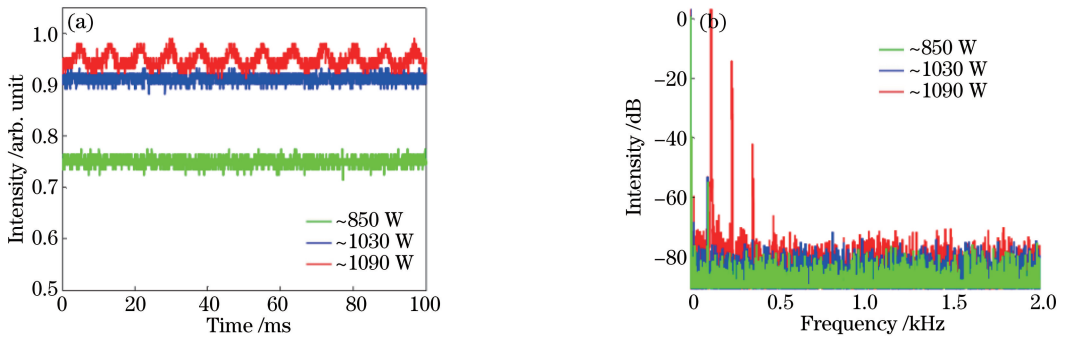


图 11 光纤激光振荡器中模式不稳定时域与频域信号。(a)时域;(b)频域

Fig. 11 Time and frequency domain signal of MI in fiber laser oscillator. (a) Time domain; (b) frequency domain

5 总结和展望

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。本文在回顾了传统热致模式不稳定研究现状之后,对最新的准静态模式不稳定以及非热致模式不稳定现象做了比较详细的描述和说明,并且简单叙述了新型模式不稳定现象与传统非线性效应之间的关系。在实验方面,对于普通非窄线宽单程光纤放大器来说,传统的热致动态模式不稳定和基于光子暗化效应的模式不稳定是限制其功率提升的最大因素,设计放大器过程中的难点就是对模式不稳定与非线性效应的平衡;对于单频和窄线宽放大器,最大的受限因素主要还是 SBS,在 SBS 的诱导下,模式不稳定现象阈值会大大降低,所以在单频和窄线宽放大器中需要设法将模式不稳定的阈值提升至 SBS 阈值之上;而在光纤振荡器中,动态热致模式不稳定和 QSMI 共同限制了其功率的提升。在理论方面,对于单程放大器中的 DMI,目前已经有比较完善的理论支撑,并且所建立的理论模型已经能够解释大部分实验现象,但是缺点是诸如锥形光纤中的模式不稳定^[53]尚没有好的模型可以描述;对于准静态和非热致的模式不稳定,理论模型尚处于初级阶段,而双程放大器中的准静态模式不稳定可以看作是模式不稳定研究由放大器向振荡器所迈出的第一步;基于光子暗化的 QSMI 以及非热致模式不稳定也作为模式不稳定中的新现象进入研究人员的视野;对于振荡器中的 DMI 研究仍然处在起步的阶段。下一步的针对模式不稳定的研究首先要关注对于特殊单程放大器的模型描述以及在不同机理下 QSMI 的详细理论与实验研究。

参 考 文 献

- [1] Shi W, Fang Q, Zhu X S, *et al.* Fiber lasers and their applications[J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [2] Saraceno C, Emaury F, Diebold A, *et al.* Trends in high-power ultrafast lasers[C]. SPIE, 2016, 9835: 98350X.
- [3] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- [4] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [5] Otto H J, Jauregui C, Limpert J, *et al.* Average power limit of fiber-laser systems with nearly diffraction-limited beam quality[C]. SPIE, 2016, 9728: 97280E
- [6] 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.
- [7] Wirth C, Schreiber T, Rekas M, *et al.* High-power linear-polarized narrow linewidth photonic crystal fiber amplifier [C]. SPIE, 2010, 7580: 75801H
- [8] Smith A V, Smith J J. Overview of a steady-periodic model of modal instability in fiber amplifiers[J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 472-483.
- [9] Jauregui C, Limpert J, Tunnermann A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- [10] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, *et al.* Thermally induced mode coupling in rare-earth doped fiber amplifiers [J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2382-2384.

- [11] Smith A V, Smith J J. Steady-periodic method for modeling mode instability in fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2606-2623.
- [12] Jauregui C, Otto H J, Limpert J, *et al.* Mode instabilities in high-power bidirectional fiber amplifiers and lasers[C]. Advanced Solid State Lasers Conference, 2015: ATh2A.24
- [13] 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: 国防科技大学, 2015.
- [14] 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 Phys Lett, 2015(12): 085101.
- [15] Smith A V, Smith J J. Influence of pump and seed modulation on the mode instability thresholds of fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2012, 20(22): 24545-24558.
- [16] Smith A V, Smith J J. Spontaneous Rayleigh seed for stimulated Rayleigh scattering in high power fiber amplifiers[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(5): 7100807.
- [17] Jauregui C, Eidam T, Otto H J, *et al.* Physical origin of mode instabilities in high-power fiber laser systems[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 12912-12925.
- [18] Tao R M, Zhou P, Xiao H, *et al.* Progress of study on mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020001.
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(2): 020001.
- [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] Laurila M, Jørgensen M M, Hansen K R, *et al.* Distributed mode filtering rod fiber amplifier delivering 292W with improved mode stability[J]. Optics Express, 2012, 20(5): 5742-5753.
- [21] Johansen M M, Laurila M, Maack M D, *et al.* Frequency resolved transverse mode instability in rod fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 21847-21856.
- [22] Otto H J, Modsching N, Jauregui C, *et al.* Impact of photodarkening on the mode instability threshold[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15265-15277.
- [23] Jansen F, Stutzki F, Otto H J, *et al.* Thermally induced waveguide changes in active fibers[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 3997-4008.
- [24] Otto H J, Stutzki F, Jansen F, *et al.* Temporal dynamics of mode instabilities in high-power fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15710-15722.
- [25] Haarlammert N, de Vries O, Liem A, *et al.* Build up and decay of mode instability in a high power fiber amplifier[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13274-13283.
- [26] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* 1.4 kW all-fiber narrow-linewidth polarization-maintained fiber amplifier[C]. SPIE, 2015, 9255: 92550B.
- [27] Otto H J, Stutzki F, Modsching N, *et al.* 2 kW average power from a pulsed Yb-doped rod-type fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2014, 39(22): 6446-6449.
- [28] Smith J J, Smith A V. Influence of signal bandwidth on mode instability thresholds of fiber amplifiers[C]. SPIE, 2015, 9344: 93440L.
- [29] Tao R M, Ma P F. Influence of core NA on thermal-induced mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(8): 085101.
- [30] Dong L. Stimulated thermal Rayleigh scattering in optical fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2642-2656.
- [31] Hu I N, Zhu C, Zhang C, *et al.* Analytical time-dependent theory of thermally induced modal instabilities in high power fiber amplifiers[C]. SPIE, 2013, 8601: 860109.
- [32] Tao R M, Ma P, Wang X, *et al.* Study of wavelength dependence of mode instability based on a semi-analytical model [J]. Journal of Quantum Electronics, 2015, 51(8): 1-6.
- [33] Ward B G. Modeling of transient modal instability in fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12053-12067.
- [34] Smith A V, Smith J J. Mode instability thresholds of fiber amplifiers[C]. SPIE, 2013, 8601: 860108.
- [35] Hupel C, Kuhn S, Hein S, *et al.* MCVD based fabrication of low-NA fibers for high power fiber laser application[C]. Advanced Solid State Lasers Conference, 2015: AM4A.2
- [36] Ma P F, Tao R M, Su R T, *et al.* 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 4187-4195.
- [37] Naderi S, Dajani I, Madden T, *et al.* Investigations of modal instabilities in fiber amplifiers through detailed numerical

- simulations[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 16111-16129.
- [38] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811W output power[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [39] Hansen K R, Lægsgaard J. Impact of gain saturation on the mode instability threshold in high-power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 11267-11278.
- [40] Smith A V, Smith J J. Increasing mode instability thresholds of fiber amplifiers by gain saturation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15168-15182.
- [41] Tao R M, Ma P F. Mitigating of modal instabilities in linearly-polarized fiber amplifiers by shifting pump wavelength [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(4): 45504.
- [42] Ward B. Theory and modeling of photo darkening-induced quasi static degradation in fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3488-3501.
- [43] Lægsgaard J. Static thermo-optic instability in double-pass fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13429-13443.
- [44] You Jie, Yu Hailong, Wang Xiaolin, *et al.* Advance in study on photodarkening of rare-earth doped fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010003.
尤 洁, 于海龙, 王小林, 等. 掺稀土光纤的光子暗化研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 010003.
- [45] Antipov O, Kuznetsov M, Tyrtshnyy V, *et al.* Low-threshold mode instability in Yb³⁺-doped few-mode fiber amplifiers: influence of a backward reflection[C]. *SPIE*, 2016, 9728: 97280A.
- [46] Antipov O, Kuznetsov M, Alekseev D, *et al.* Influence of a backward reflection on low-threshold mode instability in Yb³⁺-doped few-mode fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14871-14879.
- [47] Wang X L, Zhang H W, Su R T, *et al.* Experimental comparison of mode instability (MI) in high power fiber oscillator and fiber amplifier[C]. *Laser Optics*, 2016.
- [48] Kuznetsov M S, Antipov O L, Fotiadi A A. *et al.* Electronic and thermal refractive index changes in Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22374-22388.
- [49] Lee K H, Lee K, Kim Y, *et al.* Transverse mode instability induced by stimulated Brillouin scattering in a pulsed single-frequency large-core fiber amplifier[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(2): 189-194.
- [50] Brar K, Savage-Leuchs M, Henrie J, *et al.* Threshold power and fiber degradation induced modal instabilities in high-power fiber amplifiers based on large mode area fibers[C]. *SPIE*, 2014, 8961: 89611R.
- [51] Hejaz K, Norouzey A. Controlling mode instability in a 500 W ytterbium-doped fiber laser[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(2): 025102.
- [52] Yang B L, Zhang H W. 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.
- [53] Filippov V, Ustimchik V, Chamorovskii Y. *et al.* Impact of axial profile of the gain medium on the mode instability in lasers: regular versus tapered fibers[C]. *European Quantum Electronics Conference*, 2015: CJ_10_5