

光纤激光器模式不稳定机理及抑制方法研究进展

陈益沙, 廖 雷, 李进延

华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 光纤激光器的输出功率达到一定阈值后, 激光器中会出现模式不稳定效应, 该效应会对激光器的输出功率和光束质量造成严重影响, 限制了大功率激光器的进一步应用。研究大功率光纤激光器中的模式不稳定机理及抑制方法, 这对光纤激光器输出功率的进一步提高具有重要意义。系统介绍了模式不稳定机理, 并总结了一些模式不稳定的抑制方法。

关键词 激光光学; 掺镱光纤; 光纤激光器; 模式不稳定; 光子暗化

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.080001

Research Progress on Mode Instability Mechanism and Suppression Methods for Fiber Lasers

Chen Yisha, Liao Lei, Li Jinyan

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Mode instability effect occurs when the output power of a fiber laser reaches a certain threshold, and it results in serious influence on output power and beam quality, so that the applications of high power fiber lasers are restricted. It is meaningful to study mode instability mechanism and suppression methods for the further improvement of output power of high power fiber lasers. The mechanism of mode instability is systematically introduced, and some suppression methods are summarized.

Key words laser optics; ytterbium-doped fiber; fiber lasers; mode instability; photodarkening

OCIS codes 140.3615; 140.3425; 060.4370

1 引言

随着双包层掺镱光纤制造工艺和包层抽运技术的快速发展, 以及大量光纤器件性能全面提升, 掺镱光纤激光器在输出功率、光束质量、效率和辐射形式等方面都有着优异的性能。连续输出光纤激光器的单纤输出功率不断提高, 已达 10 kW 量级^[1-2], 超短脉冲光纤激光器的输出功率已经接近千瓦量级^[3]。随着输出功率的不断提高, 纤芯内产生极高的功率密度以及一系列如受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)、自相位调制(SPM)等非线性效应, 严重阻碍了掺镱光纤激光器输出功率的进一步提高。增大光纤的模场面积是一种降低纤芯内功率密度以及抑制 SBS、SRS 和 SPM 等非线性效应的有效手段, 一般通过减小光纤的数值孔径(NA)和增加光纤芯径来增加基模模场直径。但是, 受制造工艺的限制, 光纤的数值孔径不可能任意减小, 而光纤芯径的增加则会不可避免地增加光纤支持传播的模式, 虽然这些光纤的设计能够在高功率下保证稳定的准单模运转, 但从严格意义上而言它们的波导结构仍然是多模的, 由此带来另一种有害效应: 模式不稳定效应。模式不稳定效应是指输出的信号功率超过某一特定的阈值后, 光纤激光的输出模式会有明

收稿日期: 2017-02-15; **收到修改稿日期:** 2017-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0402201)

作者简介: 陈益沙(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事掺镱光纤激光器方面的研究。E-mail: cheniyisha@hust.edu.cn

导师简介: 李进延(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特种光纤及其应用方面的研究。

E-mail: ljj@hust.edu.cn(通信联系人)

显的与时间相关的随机变化^[4],主要表现为高阶模功率成分的急剧增加[特别是线偏振(LP_{11})模式],并伴随着快速振荡,而且输出光的光束质量会严重恶化。如果输出功率低于该阈值,则近场光斑和测得的光束质量都是单模的。但进一步研究表明^[5],通过对光束波动的傅里叶分析发现,在阈值附近光束波动的变化遵循准周期的规律,而且有着定义明确的频率,如果再进一步增加功率,光束的波动又显得更加混乱。将功率降低到阈值以下时,输出光束的质量会变得稳定。模式不稳定现象会严重恶化光纤激光的光束质量,限制了光纤激光功率的进一步提高和光纤激光的应用,近年来引起各国研究人员的广泛关注。

在模式不稳定研究方面,德国耶拿大学、美国空军实验室、美国克莱姆森大学和丹麦科技大学等机构都处于国际领先地位,这些机构对模式不稳定的物理根源和实验观察进行了大量研究。在国内,除国防科技大学对模式不稳定进行了较深入地研究之外,在模式不稳定方面公开发表的文献非常有限。

2 模式不稳定机理研究进展

德国耶拿大学 Eidam 等^[3]于 2010 年在实验过程中观察到了模式不稳定现象,随后各国研究人员对模式不稳定现象进行了大量的研究,尽管如此,模式不稳定动态现象的准确物理根源还没有被完全研究透彻。为了深入研究模式不稳定现象的物理根源,各国研究人员提出了各自的理论解释,并通过实验对此进行了证实。图 1 为模式不稳定的原理示意图,可以看出:当输出功率低于模式不稳定的阈值功率时,输出光束是稳定准单模的;而当输出功率超过模式不稳定的阈值功率后,输出光束的模式会随着时间推移产生波动,高阶模式成分增多,光斑的形状变得不规则,输出光束质量变差。

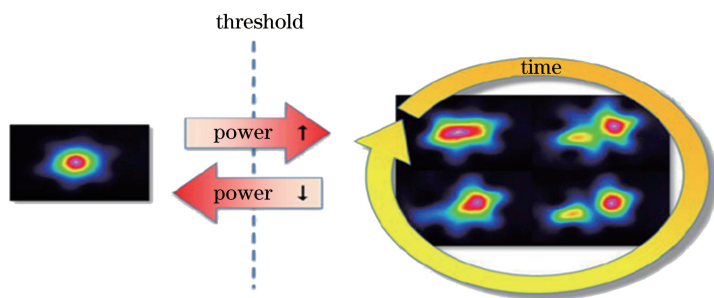


图 1 模式不稳定的原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of mode instability

目前与模式不稳定相关的机理主要包括热致折射率光栅形成机理^[3-7]、受激热瑞利散射^[8-10]、光子暗化^[11-13]和热透镜效应^[14]。

2.1 热致折射率光栅

目前由模间干涉诱导的热致折射率光栅被普遍认为是能量由基模向高阶模式耦合的原因。美国空军实验室的研究人员 Smith 等^[15]指出,只有干涉模式与折射率光栅之间存在一定的相位延迟,模式之间的能量转移才能发生。对于这一相位差的物理根源,研究人员提出了两种可能的理论解释^[16]:第一种解释是发生干涉的基模与高阶模之间存在细微的频率差,带来了相应的相位延迟^[15];第二种解释是初始的准静态热诱导波导结构变为非绝热结构,带来了相应的相位延迟^[6]。这两种理论解释都是以能量转移是由热致折射率光栅引起为前提。图 2 为热致折射率光栅形成机理的示意图。图 2(a)为光纤中激发出的两个相干模式,两个相干模式的传播产生了周期性干涉强度花样。干涉产生的驻波消耗了掺镱光纤中的激活粒子,产生了反转模式,如图 2(b)所示。反转模式具有周期性,在光纤中产生相似的温度周期分布,如图 2(c)所示。热光效应使得光纤中的温度周期分布转换成折射率周期分布,即产生了热致折射率光栅,如图 2(d)所示。

上述两种理论解释从不同角度阐释了引发模式不稳定的内在物理根源。第一种理论解释认为^[17],大部分的信号种子光激发出基模(LP_{01}),少量的种子光则会激发出高阶模式(通常是 LP_{11}),这两种模式在整段光纤中发生干涉,由于基模和高阶模的传播常数不同,它们的干涉会在整段光纤中产生振荡的信号辐射模式。抽运光总是在高信号辐射区域被更多地吸收,而且有一部分抽运光被吸收后转换成了热量,产生一个热模式,并且这个热模式会重组辐射模式,随后热模式转换成对应的温度模式,这一温度模式最终在热光效应

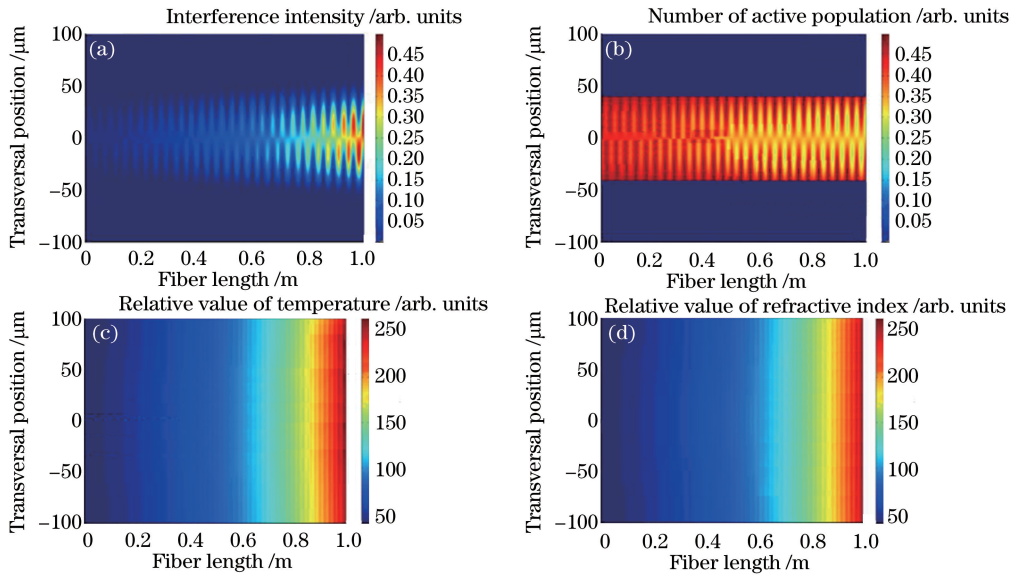


图 2 热致折射率光栅的形成机理。(a)模式干涉强度分布相对值;

(b)上能级激活粒子分布相对值;(c)温度分布相对值;(d)折射率分布相对值

Fig. 2 Formation mechanism of thermally induced refractive index grating. (a) Relative intensity distribution of mode interference; (b) relative distribution of active population of upper energy level; (c) relative temperature distribution; (d) relative refractive index distribution

下形成一个折射率光栅。如果干涉模式是静止不动的,则不会产生相位延迟。相反地,如果高阶模与基模存在细微的频率差,辐射模式就会沿着光纤移动,温度模式也会移动,但是温度模式的移动落后于干涉模式,从而产生模式间能量转移所必需的相位差。同时,该理论还指出耦合强度取决于光纤纤芯中的热扩散时间。

第二种理论解释认为^[6],光纤中沿着光纤轴向的温度分布遵循准指数函数的变化趋势,并且温度升高曲线的走向会越来越陡峭。如图 3 所示,非线性轴向温度变化会强烈扭曲低温下的准正弦温度分布,使光纤在局部区域产生很剧烈的温度变化,当光纤中的温度梯度足够大时,光纤中波导结构就变得非绝热。在如此快速的波导结构变化的条件下,光束自身无法适应这一快速的变化趋势,导致光束自身与折射率光栅不同相,通常光束的相位落后于折射率光栅的相位。该理论还指出,当高阶模式的能量占比增加到接近 50%时,这一效应还会变得更加明显,即非绝热波导结构的改变达到最大值。然而,当高阶模式的能量占比接近 100%时,由于波导结构变得更绝热,这一效应又会变弱。

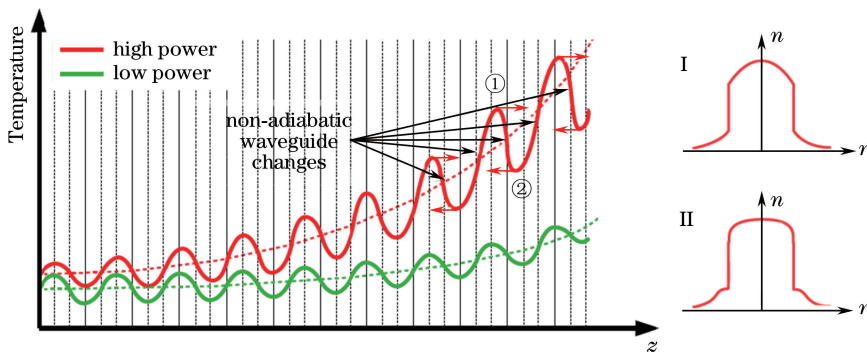


图 3 光纤在不同功率下轴向温度的变化(插图 I 为波峰①处的径向折射率分布,插图 II 为波谷②处的径向折射率分布)

Fig. 3 Changes of fiber axial temperature under different powers (insert I is radial refractive index distribution at wave peak ①, and insert II is radial refractive index distribution at wave valley ②)

2.2 受激热瑞利散射

2013 年美国克莱姆森大学 Dong^[8]指出,光纤中发生的受激热瑞利散射(STRS)效应导致模式不稳定,材料的光吸收导致材料密度的改变,使入射光发生了非线性散射;光纤材料的非线性响应与干涉模式之间存

在一个相移,这一相移是受激热瑞利散射获得增益的原因所在,其物理机制如图4所示。前向传输波和反向传输波产生一个沿着介质材料某一个方向(具体方向取决于两个传输波频率差的正负)移动的干涉模式,介质材料分子在外电场的作用下朝着电场的方向排列,最大分子排列面与最小分子排列面交替出现,入射激光在经过这些交替排列的阵列时发生散射,产生斯托克斯波,进而会增强干涉模式,而干涉模式的增强反过来又会增强斯托克斯波的强度,使得入射光不断被放大,能量从低阶模式向高阶模式耦合。在STRS模型的基础上,丹麦科技大学 Hansen 等^[9-10]建立了增益饱和模型,在计算模式不稳定阈值时将增益饱和效应考虑在内,得到的模式不稳定阈值是不考虑增益饱和效应时的3倍,原因是增益饱和效应削弱了热致折射率光栅的强度,从而使高阶模的非线性耦合系数显著减小。图4中 ω_L, k_L 分别为激光频率和波矢大小, ω_S, k_S 分别为斯托克斯散射光频率和波矢大小, Ω 和 q 分别为前向传输的激光与后向传输的散射光的干涉场频率和波矢大小, v 为前向传输的激光与后向传输散射光的干涉场传播的相速度。

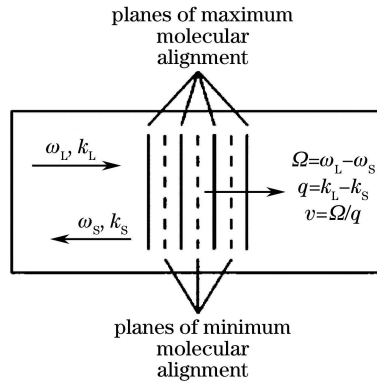


图4 受激热瑞利散射物理机制

Fig. 4 Physical mechanism of stimulated thermal Rayleigh scattering

2.3 光子暗化

2015年德国耶拿大学 Otto 等^[11]在实验过程中发现光子暗化(PD)与模式不稳定具有密切关系。在给定的实验条件下,模式不稳定的最高阈值出现在1030 nm信号波长处,而未出现在给定实验条件下的最小信号波长处。对量子亏损产热而言,信号波长与抽运波长的差值越小,产热量就越小,这说明量子亏损(QD)并非光纤中唯一的热源,理论分析表明光子暗化效应最有可能是光纤中的另一热源。该课题组对光子暗化导致的模式不稳定进行了理论模拟计算,当抽运波长为976 nm、信号输出波长为1030 nm、种子功率为35 W和光纤长度为1.2 m时,得到的结果如图5所示。光子暗化在1030 nm信号波长处仅造成了6%的功率降低,但光纤中的热负荷增加超过一倍,即光子暗化比量子亏损导致的光纤热负荷还要高。

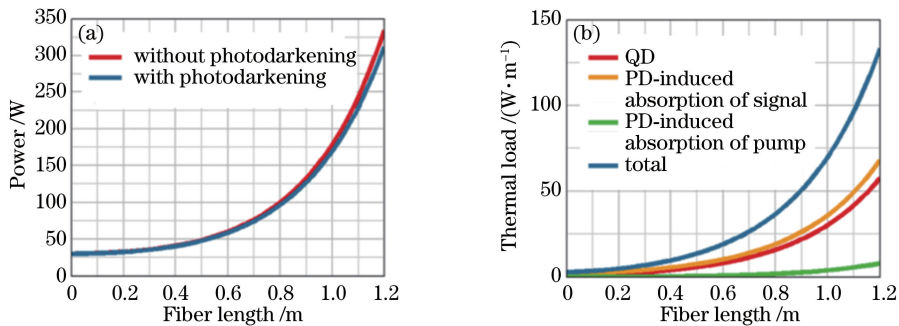


图5 (a)信号功率随光纤长度的变化;(b)热负荷随光纤长度的变化

Fig. 5 (a) Relationship between signal power and fiber length; (b) relationship between thermal load and fiber length

Otto 等计算了上述条件下的模式不稳定阈值,如图6所示。由图6(a)可以看出,当信号波长为1030 nm时,模式不稳定阈值达到最大值。在只考虑量子亏损为光纤中唯一的热源时,信号波长与模式不稳定阈值功率呈单调的负相关关系,如图6(b)所示。在考虑光暗化效应对光纤热负载的贡献后,模式不稳定阈值功率不再随着信号波长的增加而单调减小,而是在1030 nm处达到最大,原因是在这一波长处光纤中

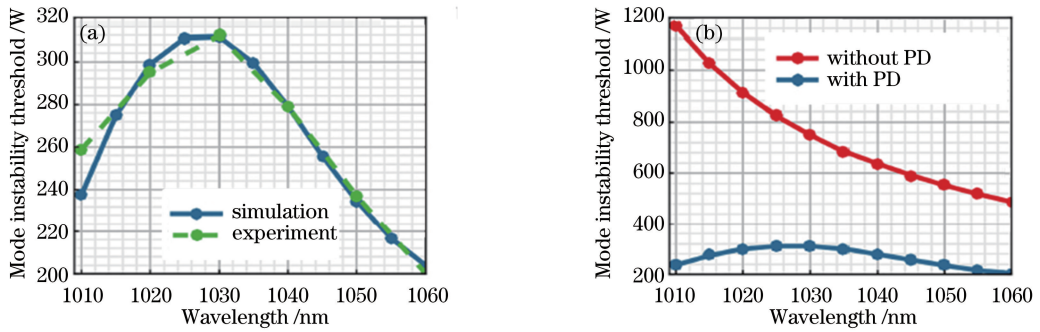


图 6 (a)理论和实验得到的模式不稳定阈值功率随信号波长的变化;

(b)考虑和不考虑光暗化效应时的模式不稳定阈值功率随信号波长的变化

Fig. 6 (a) Variation in mode instability threshold power with signal wavelength obtained by simulation and experiment;

(b) mode instability threshold power versus signal wavelength with and without considering photodarkening

平均未耗尽的反转粒子数达到了最小值,对应的光暗化损耗也达到了最小值,因此模式不稳定的阈值功率达到了最大。由图 6(b)可知,将光暗化效应考虑在内后,模式不稳定阈值功率至少下降了 50%,因此即使光暗化效应只导致了较小的功率损耗,它对模式不稳定阈值的影响也是很大的。

为了验证光子暗化效应对模式不稳定的影响, Otto 等^[11]搭建了如图 7 所示的实验装置,该装置中的种子源波长在 1010~1060 nm 范围内分立可调,所用的增益光纤为 1.2 m 长的光子晶体光纤(PCF),纤芯直径为 62 μm 。

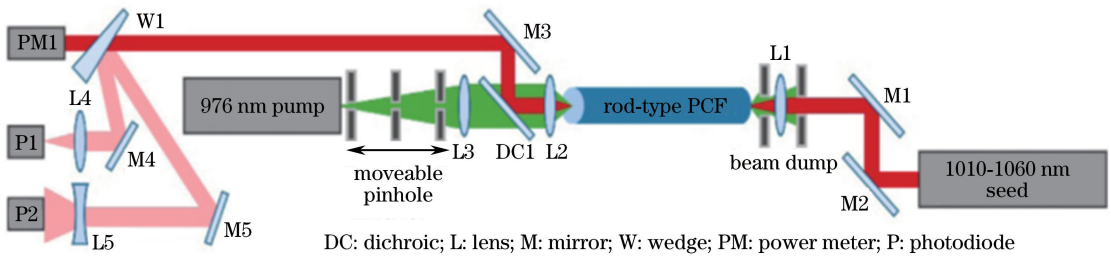


图 7 光子暗化对模式不稳定影响的实验装置原理图

Fig. 7 Experimental setup diagram of impact of photodarkening on mode instability

该课题组通过实验验证了模式不稳定阈值与输出信号波长的依赖关系,4 次重复实验均在 1030 nm 波长处达到模式不稳定的最大阈值,且未出现波长漂移。为证明模式不稳定与光子暗化之间存在的依赖关系,实验人员利用在波长为 915 nm、功率为 100 W 的激光辐照 6 h 后的光纤和未经辐照的光纤进行对比实验,结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,未经辐照光纤和经辐照光纤的模式不稳定阈值随着测量次数的变化呈完全相反的变化趋势。未经辐照光纤在放大过程中会有反转粒子剩余,这些未耗尽的反转粒子导致色心的产生,由此导致的光子暗化效应降低了模式不稳定的阈值;而经过辐照的光纤由于预先产生大量色心,色心的产生和湮灭速

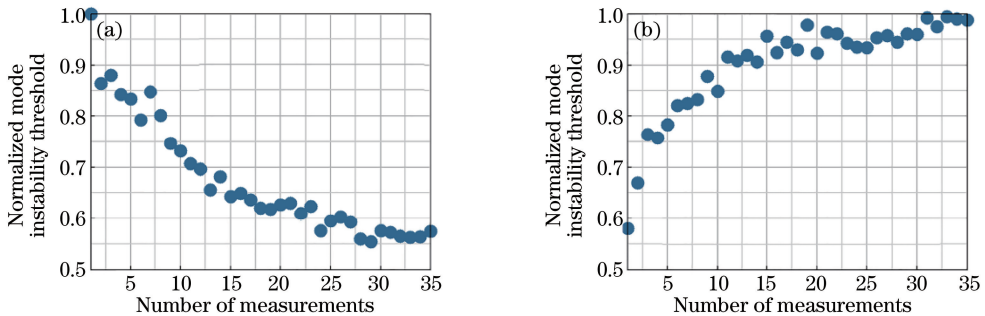


图 8 (a)未经辐照光纤的模式不稳定阈值与测量次数的关系;(b)经辐照后光纤的模式不稳定阈值与测量次数的关系

Fig. 8 (a) Relationship between mode instability threshold and number of measurements of fiber without radiation;

(b) relationship between mode instability threshold and number of measurements of fiber with radiation

率取决于当前已经存在的色心数目、反转粒子数、抽运波长和信号波长^[18],最终的光子暗化程度则是取决于色心产生和湮灭的平衡态,可以推断出在经辐照的光纤中由于预先产生了大量的色心,平衡会向着色心的湮灭方向移动。由于色心的湮灭,光子暗化效应得到了削弱,对应的模式不稳定阈值表现出升高的趋势。

2.4 热透镜效应

2016年美国克莱姆森大学 Dong^[8,14]对热透镜效应与模式不稳定阈值的关系进行了数值模拟研究,模式不稳定效应可以由基模向高阶模的非线性耦合系数表征,由非线性耦合系数的物理意义可以得到模式不稳定阈值与非线性耦合系数成负相关,并与激光器本身结构有关。对5根芯径分别为10,15,20,25,30 μm 的光纤分别进行数值模拟计算,光纤数值孔径NA为0.06,包层直径为400 μm ,输出信号波长为1.06 μm ,对应的归一化频率V分别为1.778,2.667,3.557,4.446,5.336,结果如图9所示。可以看出,第一根光纤(芯径为10 μm)是单模光纤,在归一化热透镜系数约为1时仍然可以传输LP₁₁模,即在一定的热透镜强度下,单模光纤也可能出现模式不稳定效应。此外,无论是单模光纤还是多模光纤,当归一化热透镜系数继续增大时,非线性耦合系数均存在不同程度的减小,出现该现象的原因是热透镜效应使所有的传输模式向光纤纤芯集中,但对基模的集中作用更明显,使得基模和高阶模的重叠因子减小,从而减小了基模与高阶模之间的非线性耦合系数。

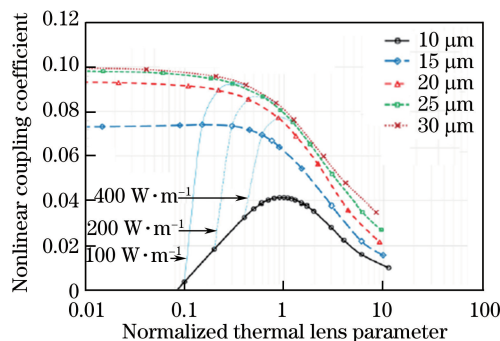


图9 非线性耦合系数与归一化热透镜参数的关系

Fig. 9 Relationship between nonlinear coupling coefficient and normalized thermal lens parameter

总体而言,目前公开报道的模式不稳定物理机制归根结底都源自光纤中的热效应。因此,对光纤中的热源及其影响因素和表现形式进行精确分析有助于深入了解和研究模式不稳定效应。

3 模式不稳定的抑制方法

目前大功率光纤激光器中的模式不稳定严重限制激光器输出功率和光束质量的进一步提升,为了增加模式不稳定阈值并减小模式不稳定的影响,研究人员提出了多种模式不稳定的抑制方法,大致可以分为两类:内禀抑制和外在抑制^[16]。

3.1 内禀抑制

模式不稳定的内禀抑制是指从掺镱光纤本身出发来抑制模式不稳定效应。

3.1.1 减小掺镱光纤抽运光吸收系数

德国耶拿大学 Jauregui 等^[16]根据半解析的模式不稳定阈值公式,提出减小掺镱光纤的抽运光吸收系数是一种有效的内禀抑制模式不稳定的方法,减小这一参数可以有效增加光纤中信号光的线性程度,如图10所示。

由图10可以看出,228 μm 抽运芯径的阈值功率为210 W,395 μm 抽运芯径的阈值功率为242 W,即抽运芯径较大时,光纤中的信号光线性程度更好,模式不稳定阈值更高。同时,光纤中的热致折射率光栅的强度也更低。

为进一步探究吸收系数与模式不稳定阈值的依赖关系,耶拿大学的研究人员进行了进一步的模拟。图11所示为在不同的抽运芯径下,光纤长度与模式不稳定阈值的关系。通过合理地设计抽运芯的芯径,可保持总的吸收不变。由图11可以看出,越长的光纤意味着越小的抽运吸收系数和越大的模式不稳定阈值。此外,已报道的更长的光纤有着更大的模式不稳定阈值主要是因为吸收系数较小。

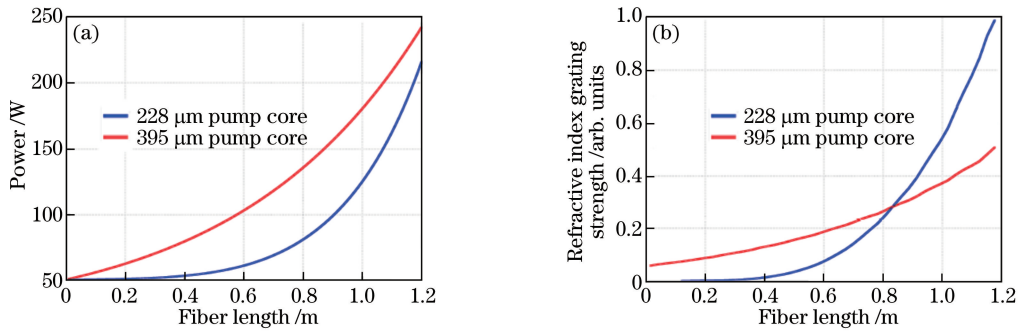


图 10 (a)不同抽运光吸收时信号光功率与光纤长度的关系;(b)不同抽运光吸收时折射率光栅强度与光纤长度的关系

Fig. 10 (a) Relationship between signal power and fiber length at different pump light absorption; (b) relationship between refractive index grating strength and fiber length at different pump light absorption

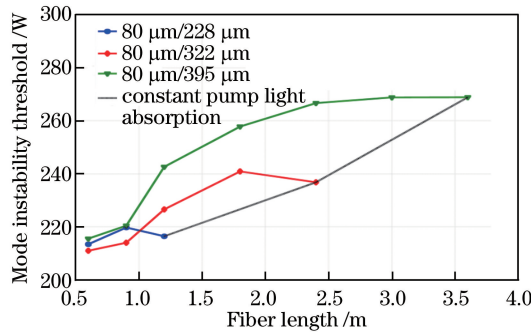


图 11 不同抽运吸收系数下模式不稳定阈值与光纤长度的关系

Fig. 11 Relationship between mode instability threshold and fiber length at different pump absorption coefficients

3.1.2 改善光纤设计

模式不稳定效应的本质是能量在基模与高阶模式之间发生强烈的动态耦合,因此通过抑制高阶模的光纤设计便可抑制模式不稳定效应和提高模式不稳定阈值,如 3C 光纤、大节距光纤和泄漏通道光纤。德国耶拿大学 Jauregui 等^[6]认为减小光纤芯径有利于提高模式不稳定阈值。丹麦科技大学 Hansen 等^[9]根据热致模式耦合理论模型,得到了固定光纤纤芯芯径下改变归一化频率 V 或掺杂半径时 LP_{01} 模向 LP_{11} 模的非线性耦合系数与频率差的变化,分别如图 12、13 所示,并得到以下结论:1) 非线性耦合系数的最大值在固定包层直径和纤芯 V 值时,对光纤芯径的变化并不敏感;2) 非线性耦合系数在固定纤芯直径时与光纤纤芯的 V 值成正相关,即模式不稳定阈值在这一条件下与光纤纤芯 V 值成负相关;3) 非线性耦合系数在固定纤芯直径和纤芯 V 值时,与掺杂半径成正相关,即模式不稳定阈值在这一条件下与掺杂半径成负相关。

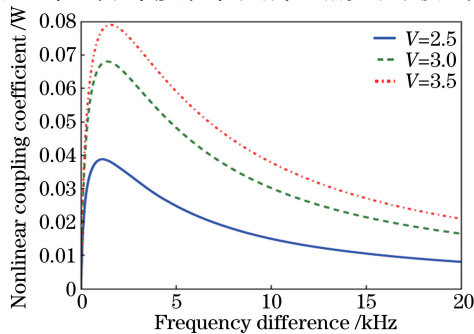


图 12 固定光纤纤芯芯径并改变 V 值时 LP_{01} 模向 LP_{11} 模的非线性耦合系数随频率差的变化

Fig. 12 Variation in LP_{01} - LP_{11} nonlinear coupling coefficient with frequency difference when fiber core radius is fixed and value of V is varying

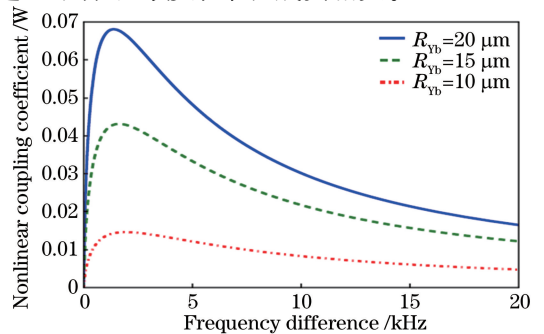


图 13 固定光纤纤芯芯径并改变掺杂半径(R_{yb})时 LP_{01} 模向 LP_{11} 模的非线性耦合系数与频率差的变化

Fig. 13 Variation in LP_{01} - LP_{11} nonlinear coupling coefficient with frequency difference when fiber core radius is fixed and doped radius is varying

3.1.3 抑制光子暗化效应

由第 2.3 节可知,光子暗化效应对模式不稳定效应有着重要的影响,因此抑制光子暗化效应能够减小光纤中的热负载并提高模式不稳定的阈值。量子亏损一般只损失一个光子 5%~8% 的能量,而对光子暗化而言,暗化的光子会将吸收的光子能量全部转换为热,光子暗化效应大大增加了光纤中热负载。因此,任何减小掺杂光纤中光子暗化效应的方法都可以抑制模式不稳定效应。光子暗化效应的抑制方法包括改进光纤材料、改变温度退火和光辐照^[19-23]。

3.2 外在抑制

模式不稳定的外在抑制是指从光纤激光器出发来抑制模式不稳定效应。

3.2.1 改变抽运/信号光波长

光纤中的热源来自与波长有关的量子亏损和光子暗化,因此对抽运/信号波长进行优化,有利于减少光纤中热源和抑制模式不稳定。德国耶拿大学的研究人员在实验中发现,在给定实验条件下,最优信号波长为 1030 nm,如图 14 所示^[13]。

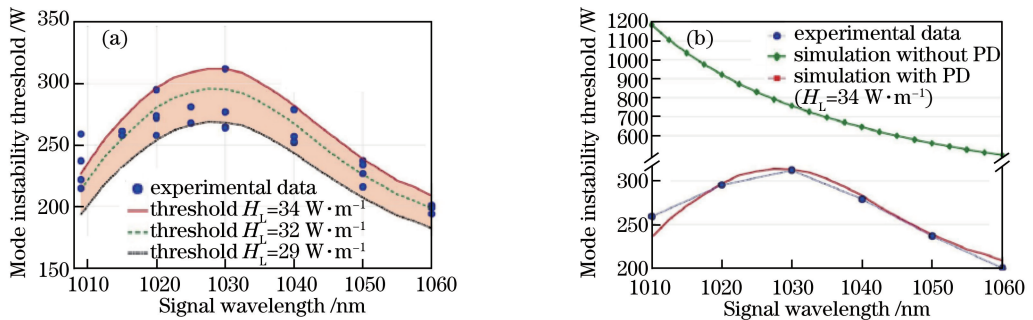


图 14 (a)不同热负载下模式不稳定阈值与信号波长的关系;

(b)考虑和不考虑光子暗化的模式不稳定阈值与光纤长度的关系

Fig. 14 (a) Relationship between mode instability threshold and signal wavelength under different thermal loads; (b) relationship between mode instability threshold and fiber length with and without considering photodarkening

耶拿大学的研究人员对抽运光波长对模式不稳定阈值的影响进行了数值模拟,结果如图 15 所示。为了保证只有抽运光波长对模式不稳定阈值产生影响,光纤长度固定为 1.2 m,对于每一波长的抽运芯径都经过合理设计,以保证相同的小抽运吸收系数。在考虑光子暗化的前提下,发现模式不稳定的最大阈值出现在 976 nm 附近,这主要是为了补偿较小的吸收系数;远离 976 nm 波长的抽运芯径需要做得小一些,以增加抽运光和掺杂区域的重叠因子,从而可使光子暗化损耗显著增加并使模式不稳定的阈值显著减小。

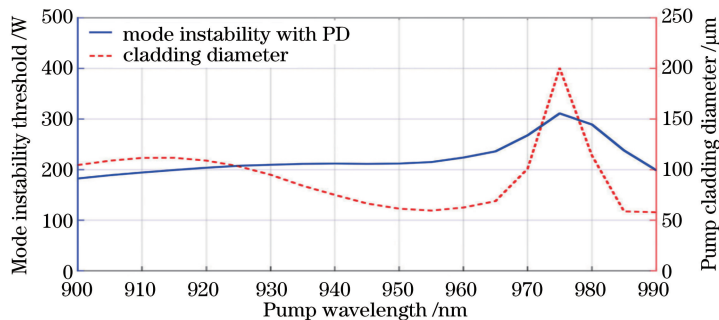


图 15 在考虑光子暗化并固定光纤长度的条件下模式不稳定阈值与抽运波长的关系

Fig. 15 Relationship between mode instability threshold and pump wavelength when photodarkening is taken into consideration and fiber length is fixed

3.2.2 抑制热致折射率光栅强度

德国耶拿大学采用了一种声光导向(AOD)装置进行模式的动态激发,以抑制模式不稳定效应,实验装置示意图如图 16 所示^[24]。

图 16 中的 AOD 由二进制周期函数驱动(如方波),仅考虑光纤中的基模和 LP_{11} 模,在这一条件下,光纤

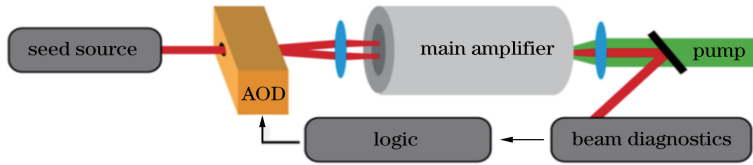


图 16 动态模式激发装置示意图

Fig. 16 Diagram of dynamic mode excitation device

纤芯中的种子光只存在两个偏转位置：一个在光纤轴上方，另一个在光纤轴下方对称的位置上。如果两个人射光的位置相对光纤中心轴对称，模式不稳定阈值将会保持不变，即在光纤中心轴对称的位置激发的模式含量保持不变。然而，通过改变导向光束的位置，可使相对干涉模式产生一个 π 的相位延迟，使得热致折射率光栅也产生一个 π 的相位延迟，因此只要选择合适的调整频率，就可以使两个对称位置的折射率光栅互相削弱，从而可抑制模式不稳定效应并提高模式不稳定阈值。

3.2.3 改变冷却方式

美国空军实验室的研究人员对冷却方式对模式不稳定的影响进行了实验研究，实验装置示意图如图 17 所示^[7]。

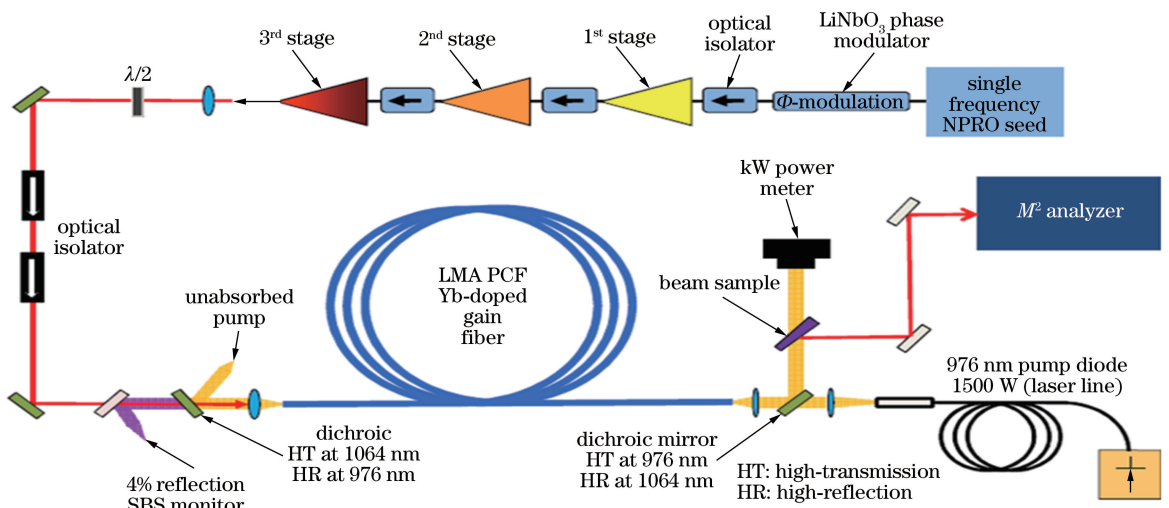


图 17 冷却方式对模式不稳定影响的实验装置示意图

Fig. 17 Experimental setup diagram of impact of cooling method on mode instability

图 17 中非平面环形腔(NPRO)激光器可以提供 10 mW 的连续种子光输出，其线宽为几千赫兹，经过前三级预放大后种子功率可达到 30 W，种子光耦合进大模场光子晶体光纤(LMA-PCF)中。所用的 PCF 尺寸：纤芯直径为 $40 \mu\text{m}$ ，包层直径为 $400 \mu\text{m}$ ，光纤长度为 10 m。美国空军实验室的研究人员采用了两种不同的冷却方式，即对流冷却方式和传导冷却方式。对于对流冷却方式，当功率低于 300 W 时，光束质量因子 (M^2) 低于 1.3，近场光斑呈高斯形状且与基模 (LP_{01}) 的光斑形状一致；当信号功率接近 380 W 时， M^2 值突变到 2.2。对于传导冷却方式，当输出功率接近 500 W 时， M^2 值在 1.4 左右。图 18 所示为在两种冷却方式下 M^2 值与输出功率的关系，可以看出改善光纤放大器的热管理对增加模式不稳定阈值和提高光束质量有明显的效果。

4 结束语

模式不稳定已经成为限制高功率光纤激光器功率进一步提升的重要因素，各国研究人员对模式不稳定效应开展了大量的研究，在机理和抑制方法上都取得了很多有意义的结果。光纤中能量由基模向高阶模发生耦合的原因是干涉模式诱导的热致折射率光栅之间存在相位差。在实验过程中也观察到了模式不稳定现象，并通过实验总结得出了模式不稳定阈值的依赖条件和抑制方法。目前，关于模式不稳定现象还存在一些

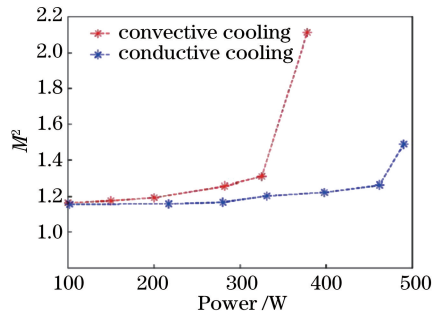


图 18 对流冷却和传导冷却条件下 M^2 与输出功率的关系

Fig. 18 Relationship between M^2 and output power under convective cooling and conductive cooling conditions

问题待解决, 对干涉模式和折射率光栅相位差的产生机理仍需进一步地研究, 未来的研究重点在于模式不稳定的抑制方案上, 如光纤结构的优化以及新型结构光纤的设计、量子亏损的减少以及激光器散热方式的改良。研究表明, 光子暗化效应会极大地增加光纤中的热负载, 导致模式不稳定阈值的大幅减小, 使光纤的性能严重恶化, 因此光子暗化效应与模式不稳定效应的物理机制的联系也是一个研究重点。目前, 模式不稳定的抑制方法主要针对空间耦合结构的光子晶体光纤激光器, 输出功率也仅限于百瓦量级, 而对千瓦级大功率全光纤激光器中的模式不稳定的抑制方法鲜有实验报道, 因此有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Gapontsev V, Fomin V, Ferin A, *et al.* Diffraction limited ultra-high-power fiber lasers [C]. Lasers, Sources and Related Photonic Devices, 2010: AWA1.
- [2] 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.
- [3] Eidam T, Hanf S, Seise E, *et al.* Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power [J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 94-96.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Ward B, Robin C, Dajani I. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11407-11422.
- [8] Dong L. Stimulated thermal Rayleigh scattering in optical fibers [J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2642-2656.
- [9] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, *et al.* Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2013, 22(9): 1944-1971.
- [10] Hansen K R, Lægsgaard J. Impact of gain saturation on the mode instability threshold in high-power fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2014, 21(2): 11267-11278.
- [11] 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.
- [12] Jauregui C, Otto H-J, Modsching N, *et al.* Recent progress in the understanding of mode instabilities [C]. SPIE, 2015, 9344: 93440J.
- [13] 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]. Optics Express, 2015, 23(16): 20203-20218.
- [14] Dong L. Thermal lensing in optical fibers [J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19841-19852.
- [15] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [16] Jauregui C, Otto H-J, Stutzki F, *et al.* Passive mitigation strategies for mode instabilities in high-power fiber laser

- systems[J]. Optics Express, 2013, 21(16): 19375-19386.
- [17] Smith A V, Smith J J. Steady-periodic method for modeling mode instability in fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2606-2623.
- [18] Jetschke S, Unger S, Röpke U, *et al.* Photodarkening in Yb doped fibers: Experimental evidence of equilibrium states depending on the pump power[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14838-14843.
- [19] 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.
- [20] Broer M M, Krol D M, DiGiovanni D J. Highly nonlinear near-resonant photodarkening in a thulium-doped aluminosilicate glass fiber[J]. Optics Letters, 1993, 18(10): 799-801.
- [21] Atkins G R, Carter A L G. Photodarkening in Tb³⁺-doped phosphosilicate and germanosilicate optical fibers[J]. Optics Letters, 1994, 19(12): 874-876.
- [22] Koponen J J, Söderlund M J, Hoffman H J, *et al.* Measuring photodarkening from single-mode ytterbium doped silica fibers[J]. Optics Express, 2006, 14(24): 11539-11544.
- [23] Liu Chaoping, Liao Lei, Li Jinyan. Research progress on photodarkening of Yb-doped fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070002.
刘超平, 廖 雷, 李进延. 掺镱光纤激光器光子暗化现象的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070002.
- [24] Otto H-J, Jauregui C, Stutzki F, *et al.* Controlling mode instabilities by dynamic mode excitation with an acousto-optic deflector[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 17285-17298.