

高功率掺镱光纤的现状与发展趋势

王一礴, 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 自光纤激光器问世以来,随着半导体材料与光纤制备技术的快速发展,光纤激光器的输出功率由毫瓦级提高到了万瓦级。然而,随着输出功率的增加,光纤激光器在低输出功率下未表现出的诸多现象逐渐显现,如光纤热损伤、非线性效应、模式不稳定等,这些现象限制了光纤激光器的应用,因此对掺镱光纤的质量要求越来越高。针对高功率掺镱光纤的制备工艺、掺杂组分及结构设计等方面进行了讨论,分析了高功率掺镱光纤的热稳定性、功率稳定性及模式稳定性的研究现状,并总结了其发展趋势。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 掺镱光纤; 模式不稳定; 光子暗化效应

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201744.0201009

Status and Development Tendency of High Power Ytterbium Doped Fibers

Wang Yibo, Li Jinyan

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

Abstract Since the emergence of fiber lasers, the output power of fiber laser has been increased from milliwatt level to myriawatt level along with the rapid development of semiconductor material and fiber fabrication technology. However, with the increasing of output power of fiber laser, many phenomenons which are not shown at a low output power have appeared gradually, such as fiber thermal damage, nonlinearity effect and mode instability, which limit the application of fiber laser. Therefore, the demand for the quality of Yb-doped fiber is higher and higher. The fabrication technologies, doping components and structural design of high power Yb-doped fibers are discussed. The status and development tendency of thermal stability, power stability and mode stability of high power Yb-doped fiber are analyzed.

Key words laser technique; fiber lasers; Yb-doped fibers; mode instability; photo darkening effect

OCIS codes 140.3510; 060.2290; 060.2320; 060.3510

1 引 言

20 世纪 60 年代,Snitzer^[1-2]报道了第一台光纤激光器,随后研究了光纤激光器的放大作用^[3]。1985 年, Poole 等^[4-5]证明了掺铈光纤对信号光的放大作用,掺铈光纤在光通信领域有广阔的应用前景。相比于掺铈光纤和掺铊光纤,掺镱光纤具有能级结构简单、增益带宽较宽等优点,逐步成为高功率光纤激光器中广泛使用的一种增益介质。在过去近 20 年里,掺镱光纤激光器的输出功率由毫瓦级迅速增长至万瓦级。光纤激光器输出功率的不断提高主要得益于:1) 半导体激光器输出功率的不断提高,为光纤激光器提供了更高的抽运功率;2) 双包层光纤结构可以降低抽运光的功率密度,使掺镱光纤吸收高功率的抽运光,在此基础上采用非圆形结构的内包层,大幅增加了纤芯对抽运光的吸收效率;3) 掺镱光纤制备工艺的不断改进,提高了光纤激光器的转化效率,通过对光纤组分及工艺流程参数的不断优化,解决了高功率光纤激光器面临的热管理、光子暗化等问题,并提高了光纤激光器输出功率的稳定性。

2004 年,Jeong 等^[6]将掺镱光纤激光器的输出功率提高至千瓦级(达到了 1.36 kW),斜率效率为 79%。

收稿日期: 2016-09-12; 收到修改稿日期: 2016-11-03

作者简介: 王一礴(1989—),男,博士,主要从事特种光纤方面的研究。E-mail: wangyibo@hust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ljy@mail.hust.edu.cn

该激光器的掺镱光纤采用 D 形内包层, 纤芯数值孔径 (NA) 为 0.05, 较小的 NA 可以保证更好的光束质量。2009 年, IPG Photonics 公司实现了输出功率达 10 kW 的掺镱光纤激光器, 该激光器采用主振荡功率放大结构, 且放大级的抽运源为 1018 nm 掺镱光纤激光器, 从而增加了抽运光的亮度, 降低了量子亏损, 增强了激光器的热稳定性^[7]。目前, 对于 IPG Photonics 公司生产的掺镱光纤激光器, 使用单模光纤时输出功率可超过 10 kW, 使用多模光纤时输出功率可超过 100 kW, 且激光器的功率稳定性为 2%, 即激光器在连续工作 4 h 内输出功率的波动小于 2%, 这对激光器的热稳定性及光纤抗光子暗化性能提出了较高要求。

随着对光纤激光器功率要求的进一步提高, 掺镱光纤面临巨大的挑战, 包括光纤损耗带来的热稳定性下降、光子暗化效应带来的功率稳定性下降以及模式不稳定等。本文将针对这 3 个方面阐述高功率掺镱光纤的研究进展及未来发展趋势。

2 热稳定性

热管理是研究高功率光纤激光器的重点问题之一。对于千瓦级光纤激光器, 一般用水冷的方式对光纤及激光二极管进行降温; 对于万瓦级光纤激光器, 只采用水冷方式并不能满足要求, 需要进一步提高光纤质量。对光纤激光器从以下两个方面进行改进: 1) 降低光纤损耗, 在低功率光纤激光器中, 光纤对信号光及抽运光的损耗可以忽略, 然而在万瓦级激光器中, 微小的损耗产生的热量不可忽视; 2) 提高掺镱光纤的匹配程度, 光纤之间的熔接不匹配造成的模式耦合会使包层激光增多, 加剧光纤涂覆的老化, 降低转化效率, 并增大输出端滤模的压力。由于光纤之间的匹配不要求掺镱光纤与无源光纤在几何尺寸上完全一致, 只需要模场的匹配, 且弯曲损耗等参数也应与无源光纤保持一致, 因此需要精确控制掺镱光纤的折射率剖面。图 1 为两种纤芯折射率剖面, 当纤芯直径与 NA 相同时, 相对于折射率剖面中心凹陷的光纤[图 1(b)], 折射率剖面平坦的光纤[图 1(a)]的基模模场面积较小, 相同弯曲半径下的弯曲损耗也较小。因此在光纤制备过程中需要综合考虑多个因素来确定制备参数。

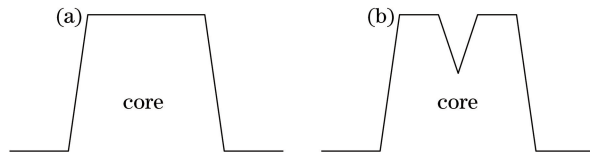


图 1 纤芯折射率剖面。(a)平坦的剖面;(b)中心凹陷的剖面

Fig. 1 Refractive index profiles of fiber cores. (a) Flat profile; (b) profile of central depression

传统掺镱光纤的制备方法将改进的化学气相沉积(MCVD)法与溶液掺杂法相结合。该方法利用稀土离子溶液浸泡的方式掺杂稀土离子, 因此稀土元素的纯净度会影响光纤损耗; 浸泡溶液过程中需将反应管多次从车床上取下, 因此会引入杂质。Sekiya 等^[8-9]利用 $\text{Yb}(\text{C}_{11}\text{H}_{19}\text{O}_2)_3$ [也可写成 $\text{Yb}(\text{DPM})_3$] 材料进行气相掺镱。 $\text{Yb}(\text{DPM})_3$ 在温度大于 200 °C 时转化为气态, 高温下在反应管内与氧气反应, 生成 Yb_2O_3 并沉积到内壁。该方法将 Yb^{3+} 离子的掺杂转变为类似于二氧化硅的气相沉积, 不仅保证了原材料的纯度, 而且无需将反应管取下, 减少了杂质的引入。该方法还可以精确控制稀土离子浓度, 获得较为平坦的折射率剖面, 如图 2 所示, 图中 n 为材料折射率, Δn 为材料折射率的改变量。

高功率掺镱光纤需要大模场面积(LMA), 以降低光纤损伤阈值, 因此要求在预制棒制备过程中进行多次疏松层沉积, 而不断取下和焊接反应管的过程极易引入杂质。2010 年, Webb 等^[10]报道了溶液在线掺杂 MCVD 工艺(图 3), 将溶液通过导管输送到反应管内, 溶液中的掺杂离子渗透进了疏松层, 无需将反应管取下, 因此不会在多次溶液掺杂时引入杂质, 从而可以实现高浓度掺杂。2011 年, Leich 等^[11]利用粉末烧结法制备掺镱光纤预制棒的纤芯。首先取一定量的纯石英粉末置于管中, 加入一定浓度的 Yb^{3+} 离子和 Al^{3+} 离子溶液, 配成悬浊液, 将溶液干燥后 Yb^{3+} 和 Al^{3+} 离子会附着在石英粉末中, 将粉末挤压烧结成玻璃, 即可得到掺镱芯棒, 上述过程中还需进行材料的提纯与气泡的清除。该方法可以得到均匀的离子分布与平坦的折射率剖面(图 4), 且能够实现大尺寸的芯棒制备。

对比几种光纤预制棒的制备方法, 利用气相掺杂得到的掺镱光纤具有低损耗、剖面可精确控制的特点, 但是该方法对设备要求较高; 利用粉末烧结法可得到大尺寸芯棒, 得到的芯棒折射率剖面平坦, 但是该方法

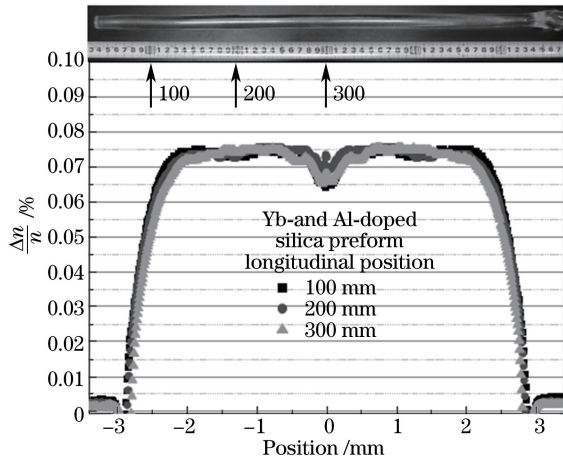


图 2 气相沉积掺镱光纤预制棒的折射率剖面^[8]

Fig. 2 Refractive index profile of Yb-doped fiber preform rod by vapor-phase deposition^[8]

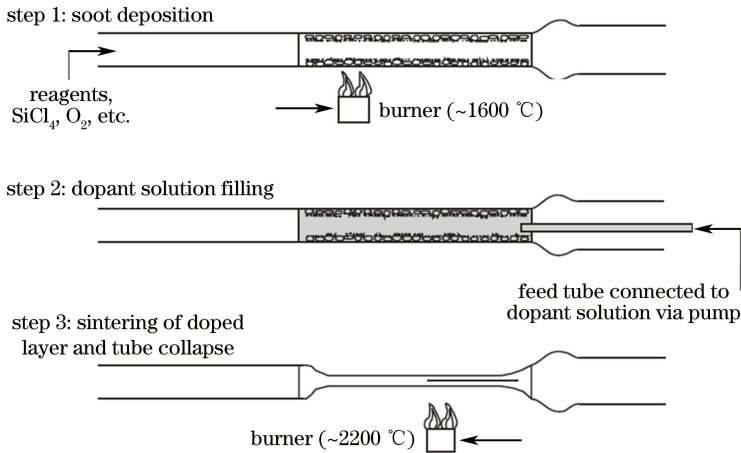


图 3 溶液在线掺杂 MCVD 工艺示意图^[10]

Fig. 3 Schematic of solution in-situ doping MCVD process^[10]

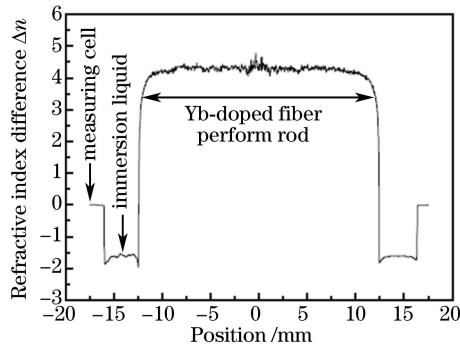


图 4 粉末烧结法制备掺镱光纤预制棒的折射率剖面^[11]

Fig. 4 Refractive index profile of Yb-doped fiber preform rod by powder sintering technology^[11]

操作复杂,对设备要求很高;在线掺杂法的操作相对简单,省去了多次取下反应管的过程,一定程度上降低了光纤损耗。长期以来,降低光纤损耗都是提高光纤激光器输出功率的必要条件之一,更低的光纤损耗需要更加优化的制备方法。此外,根据光纤预制棒折射率剖面,计算得到最佳拉丝尺寸,从而获得与无源光纤相匹配的模场,这对于激光器热稳定性的提高也是不可或缺的。

3 功率稳定性

随着光纤激光器功率的不断提高,其功率输出的稳定性面临着极大挑战,这些挑战主要来源于光纤器件

之间熔接损耗带来的热损伤、抽运源的不稳定性等方面。在高功率光纤激光器的运行过程中,掺镱光纤损耗也会增加,使输出功率下降并产生光子暗化效应,从而使得光纤激光器的功率稳定性严重下降并缩短了光纤激光器的使用寿命。光子暗化效应不仅表现在光纤损耗的增加上,而且也会减少 Yb^{3+} 离子的荧光寿命并损耗抽运功率。一般利用光子暗化后光纤的附加损耗来表征光子暗化效应,损耗谱从可见光波段延伸至近红外波段,在可见光波段的附加损耗更大,因此一般采用 633 nm 左右的附加损耗来表征光子暗化效应。

3.1 光子暗化效应的产生机理

光子暗化效应的产生机理目前还没有定论,但研究人员均认为光子暗化效应主要是由光纤内色心引入的附加损耗引起的。影响色心产生的因素主要包括氧缺陷中心、电荷转移吸收带及 Tm^{3+} 离子等。

2007 年, Yoo 等^[12]通过实验证明光子暗化效应来源于 Yb^{3+} 离子对氧空位缺陷(Yb-Yb ODC)和镱铝氧空位缺陷(Yb-Al ODC)。2008 年, Dragic 等^[13]发现非桥氧空位中心(NBOHC)也能引起光子暗化效应。2012 年, Dragic 等^[14]又通过实验证明二类氧空位缺陷(ODCII)与 Yb^{3+} 离子之间存在能量传递,这也是产生光子暗化效应的原因。

除了氧缺陷,电荷转移(CT)也可以形成色心,从而产生光子暗化效应。Engholm 等^[15-18]认为在 Yb^{3+} - Yb^{3+} 的相互作用或者更为复杂的离子团簇过程中会产生 Yb^{2+} 。此外,研究人员还发现在 Al^{3+} 浓度很低或 Yb^{3+} 离子浓度很高的情况下,光子暗化效应会增强^[19-20],而在 P^{3+} 浓度较高的掺镱光纤中,光子暗化效应得到了抑制^[21],Engholm 利用电荷转移理论对该现象进行了解释。

Tm^{3+} 与掺镱光纤的光子暗化效应相关是近几年出现的观点,且存在一些争论。2010 年, Peretti 等^[22]认为 Yb^{3+} 与 Tm^{3+} 杂质间存在能量传递, Tm^{3+} 被激发到高能级,由高能级跃迁至基态后发出的紫外荧光会使光纤基质形成色心。2013 年, Jetschke 等^[23]制备了一系列掺镱光纤, Tm_2O_3 的物质的量分数为 $(0.01 \sim 680) \times 10^{-6}$ 。该实验中,当 Tm^{3+} 浓度很低时,掺镱光纤的光子暗化效应随着 Tm^{3+} 浓度的增加逐渐增强;当 Tm_2O_3 的物质的量分数大于 5×10^{-5} 时,光子暗化的附加损耗与 Yb/Al 光纤相比没有明显增加。

3.2 光子暗化效应的抑制方法

光子暗化效应的抑制方法有多种,其中共掺其他离子是最普遍的方法。2008 年, Jetschke 等^[24]研究了 Al^{3+} 、 P^{3+} 浓度对掺镱光纤光子暗化效应的影响。实验证明, Al^{3+} 、 P^{3+} 浓度的增加在一定程度上可以降低光子暗化效应,且当 Al^{3+} 和 P^{3+} 的浓度比为 1:1 时,掺镱光纤几乎没有光子暗化效应。利用改进的化学气相沉积法制备光纤预制棒时, P^{3+} 的易挥发特性导致纤芯折射率产生凹陷,从而影响掺镱光纤的性能。因此,掺镱光纤中需共掺 Al^{3+} , Al^{3+} 不仅可以降低光子暗化效应,而且 Al^{3+} 可有效提高石英基质中 Yb^{3+} 的溶解度。2009 年, Engholm 等^[25-26]在掺镱光纤中引入铈离子($\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$),对比测试了 Yb/Al 和 Yb/Al/Ce 光纤的光子暗化附加损耗,发现铈离子的引入能够提高掺镱光纤的抗光子暗化性能,这是由于共掺铈离子光纤中存在的 2 种价态的铈离子可以捕获电子或者空穴并转化成另一种价态,从而抑制色心的形成,降低了光子暗化效应。近年来,本课题组也在此方面进行了深入研究,图 5 为不同 Ce^{3+} 浓度的掺镱光纤在纤芯抽运 225 min 后波长为 633 nm 处附加损耗的变化情况,光纤 D1 不掺杂 Ce^{3+} , 光纤 D2、D3、D4 的 Ce^{3+} 的掺杂浓度比为 1:2:4。相比于未掺杂 Ce^{3+} 的 D1,其他 3 根光纤具有明显的抗光子暗化作用;D4 与 D3 相比,尽管 Ce^{3+} 浓度

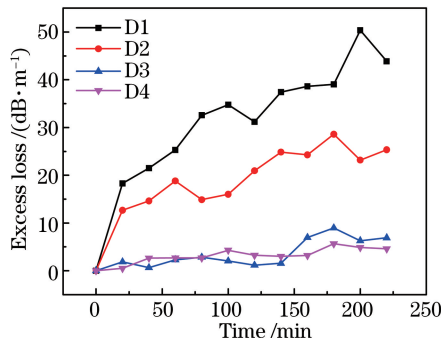


图 5 不同 Ce^{3+} 浓度的掺镱光纤在 633 nm 处的附加损耗

Fig. 5 Excess loss of Yb-doped fibers with different Ce^{3+} concentrations at 633 nm

相差 1 倍,其附加损耗没有明显变化,因此铈离子的共掺不是越多越好,过多的铈离子浓度会显著提高纤芯 NA,也会引入损耗,降低激光效率。

利用漂白也可以降低光子暗化效应。光子暗化效应的漂白是指对已经产生光子暗化的掺铈光纤进行一定的处理,使其光子暗化效应在一定程度上减弱甚至消失。根据处理方法的不同,漂白可分为光漂白和热漂白。

目前,对掺铈光纤的光子暗化效应具有光漂白作用的光波长有 355 nm^[27]、405 nm^[28]、543 nm^[29]、550 nm^[30]、633 nm^[18]和 793 nm^[31]等,各个波长对应的漂白效果不同,其漂白原理也处于探究阶段。2007 年,Hönninger 等^[27]发现波长为 355 nm 的光可以使已产生光子暗化效应的掺铈光纤完全恢复为最初状态,并且光子暗化与漂白的过程可以不断重复。Piccoli 等^[28]发现波长为 405 nm 的光并不能完全漂白掺铈光纤的光子暗化。本课题组对波长为 793 nm 的光子暗化漂白作用进行了研究。2015 年,Zhao 等^[31]利用波长为 793 nm 的光激发产生光子暗化效应的掺铈光纤,发现光子暗化引起的附加损耗在波长为 793 nm 的光的作用下明显减弱。此外,相比利用波长为 915 nm 的光单独抽运,利用波长为 915 nm 和 793 nm 的光共同抽运掺铈光纤可明显抑制光子暗化效应的产生,在一定程度上说明 Tm^{3+} 离子与掺铈光纤的光子暗化效应有关。

在高温下,掺铈光纤的光子暗化也会得到恢复。根据不同研究人员的报道,光子暗化导致的附加损耗随温度升高的变化不尽相同。2006 年,Jasapara 等^[32]利用高温处理光子暗化后的掺铈光纤,发现温度为 500 °C 时光子暗化效应得到了完全漂白。Basu 等^[33]在实验中观察到温度为 120 °C 时光纤的附加损耗高于常温状态下的光纤附加损耗。Leich 等^[34]发现温度低于 470 K 时,短波长与长波长处的损耗随温度升高的变化趋势是相反的;当温度为 770 K 时,光子暗化效应被完全抑制。

除了上述几种抑制光子暗化效应的方法外,还有载氢气、载氧气等措施。为了减少光子暗化效应对高功率光纤激光器的影响以及提高激光器的功率稳定性,光纤生产厂家在掺铈光纤制备过程中都对光纤进行抗光子暗化处理,普遍采用的方法为共掺 P 或 Ce 等元素。随着光纤激光器输出功率的进一步提升,对掺铈光纤的要求也越来越高,更多的掺杂组分是解决途径之一,如何最大化各组分的功能并避免多组分产生的高损耗、低损伤阈值、高 NA 等问题,仍是今后需解决的关键问题。

4 模式稳定性

4.1 模式不稳定的理论及实验研究

模式不稳定(MI)指被放大的信号功率超过某一特定的阈值后,光纤激光器的输出模式会带有明显与时间相关的随机变化特性^[35]。2010 年,Eidam 等^[36]在实验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研究,但是准确的物理根源还未得知。目前,研究人员普遍认为两个共同传播且相互之间存在功率共振耦合的横模干涉能够诱导热及粒子数反转并形成折射率光栅,形成的折射率光栅和干涉模式会自动完成周期匹配,使能量可以发生转移,导致模式不稳定现象的出现。随后,Smith 等^[37]指出仅完成周期匹配并不能使干涉模式之间发生能量转移,干涉模式和折射率光栅之间必须存在一定的相位延迟,才能发生能量转移。对于相位差的物理根源,研究人员提出了 2 种可能的理论解释:1) 相位差是由发生干涉的基模和高阶模之间存在细微的频率差引起的^[37];2) 相位差是由初始的准静态热诱导波导结构向非绝热结构的转变带来的相位延迟^[38]。

2011 年,Eidam 等^[36]在实验中观察到了模式不稳定下的近场光斑,实验中采用大间距光子晶体光纤(PCF)。图 6(a)为输出功率低于模式不稳定阈值时的近场光斑图,图 6(b)为输出功率高于模式不稳定阈值时的近场光斑图。信号输出波长和抽运波长均为 976 nm,将输出功率为 5 W 的脉冲种子光源放大到平均输出功率为 270 W,脉冲种子光源的光谱谱宽为 7 nm,中心波长为 1040 nm,重复频率为 40 MHz。输出的平均功率达到模式不稳定阈值后,平均输出功率还可以继续被放大,同时输出光束的光束质量(M^2)会进一步恶化。模式不稳定的波动频率一般在几千赫兹范围内,如果继续增加抽运功率,波动会变得更加混乱,这和文献^[39]中的理论分析结果是一致的。

随后的实验研究中,Smith 等^[37,40]发现对于一种给定的光纤设计,无论是连续光输出还是脉冲输出,模式不稳定阈值一般都出现在同一个数量级,这便从原理上排除了模式不稳定对峰值功率的强依赖性。图 7 为光束质量和信号功率之间的关系^[36],图 7(a)中的光纤为 7 孔光子晶体光纤,模场直径为 33 μm ;图 7(b)中

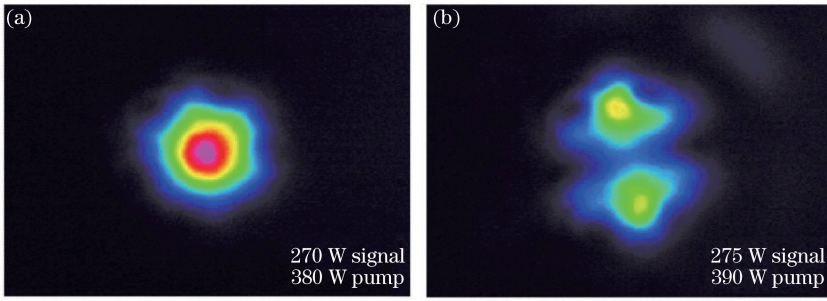


图 6 输出功率(a)低于和(b)高于模式不稳定阈值时的近场光斑^[36]

Fig. 6 Near field spots when output powers are (a) below and (b) above mode instability threshold^[36]

的光纤为阶跃折射率分布的光纤,模场直径为 $27\ \mu\text{m}$ 。由图 7 可知,在给定实验条件和光纤下,模式不稳定阈值功率分别为 700,1200,1740 W。随后,Wirth 等^[40]在高功率脉冲光纤激光器实验中发现模式不稳定的建立时间随吸收的抽运光功率的增加呈指数衰减,并最终衰减至 1.6 ms,如图 8 所示。后续实验表明,模式不稳定现象的持续时间约为 90 ms,这一系列实验证明了模式不稳定的建立和衰退时间都为毫秒量级,说明模式不稳定现象的根源可以追溯到热效应。同年,Ward 等^[41]也研究了冷却方式对模式不稳定的影响,激光器实验装置原理图如图 9 所示。图中非平面环形振荡器(NPRO)提供输出功率为 10 mW 的连续种子光,线宽为几千赫兹左右,经过前 3 级预放大后种子光功率达到 30 W,并耦合进 PCF 中,PCF 的包层直径为 $400\ \mu\text{m}$,纤芯直径为 $40\ \mu\text{m}$,光纤长度为 10 m。为研究主动冷却对模式不稳定性的影响,Ward 等采用了 2 种不同的冷却方式。对于对流冷却方式,当信号输出功率低于 300 W 时, M^2 值低于 1.3,且近场光斑呈高斯分布,与基模(LP_{01})的光斑形状一致;当信号输出功率接近 380 W 时, M^2 值突变为 2.2。对于传导冷却方式,当信号输出功率接近 500 W 时, M^2 值约为 1.4。图 10 为两种冷却方式下 M^2 值和输出功率之间的关系。由图 10 可知,改善光纤放大器的热管理有利于增加模式不稳定阈值及提高光束质量。

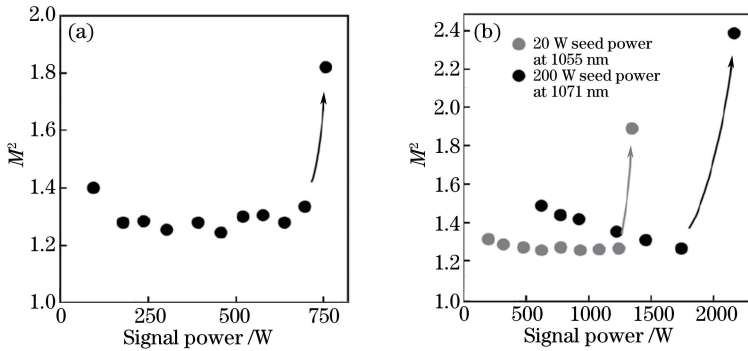


图 7 光束质量与信号输出功率之间的关系。(a) PCF;(b)阶跃折射率分布光纤^[36]

Fig. 7 Relationship between beam quality and signal output power. (a) PCF; (b) step refractive index distribution fiber^[36]

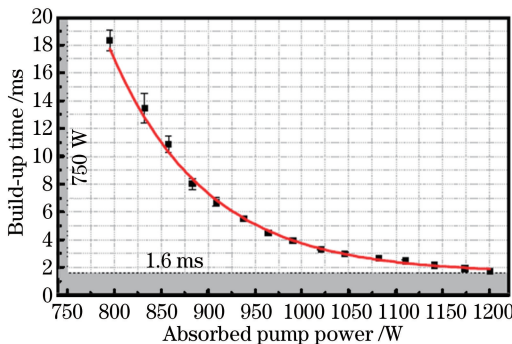


图 8 模式不稳定的建立时间与吸收抽运光功率之间的关系^[40]

Fig. 8 Relationship between mode instability build-up time and absorbed pump light power^[40]

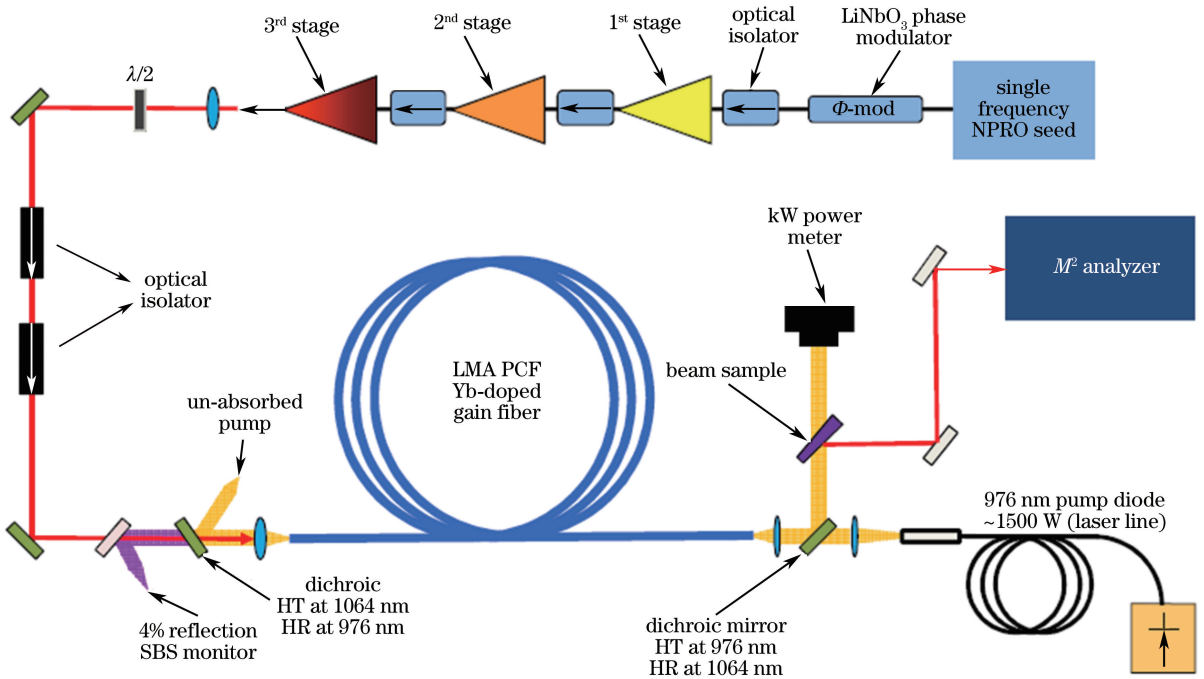


图 9 激光器实验装置原理图^[41]

Fig. 9 Schematic of laser experimental setup^[41]

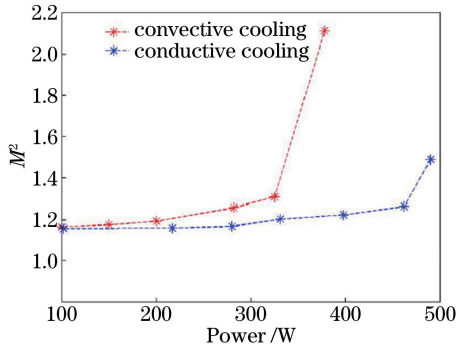


图 10 两种冷却方式下光束质量与输出功率之间的关系^[41]

Fig. 10 Relationship between beam quality and output power with two cooling methods^[41]

4.2 模式不稳定的抑制方法

抑制模式不稳定的方法有很多。首先,模式不稳定产生的根源在于热问题,因此减少激光器中热源的产生并进行有效冷却是抑制模式不稳定的有效途径之一。文中第 2 节已从光纤制备工艺的角度介绍了减少激光器热负载的方法。同带级联抽运则是从光纤激光器结构的角来降低激光器的量子亏损和减少热负载。其次,模式之间的干涉也是产生模式不稳定的因素之一,因此保证光纤中存在较少的模式也是提高模式不稳定阈值的方法之一。为减少光纤的模式数量,近年来涌现出大量新型的光纤结构。2007 年, Dong 等^[42-43]提出泄漏通道光纤,在光纤纤芯周围排列了 6 个空气孔,该光纤与传统阶跃光纤的最大区别在于光纤纤芯的边界是开放的,因此在纤芯中不存在全内反射,光纤中所有的模式都是泄漏模。基于 PCF, Dong 等制备了掺镱双包层光纤,空气孔直径为 55 μm ,周期为 67 μm ,纤芯直径为 79 μm ,掺镱区域直径为 40 μm 。通过测试激光性能,得到的斜率效率为 60%, M^2 为 1.3。手性螺旋芯光纤^[44-46]结构包含一个直的中央纤芯和一个螺旋的侧芯,侧芯与中央纤芯保持一定的光学距离并围绕中央纤芯呈螺旋状,通过调节相速度的准相位匹配 $\Delta\beta_{\text{QPM}}$,实现中央纤芯的高阶模向螺旋侧芯的有效耦合,再通过合理设计侧芯结构参数,达到单模输出的目的。除此之外,利用低通滤波器和下陷层光纤等也可以有效减少光纤的模式数量。但是,上述光纤存在制备复杂、效率不高、难以实现高功率或全光纤结构等问题,因此需要寻求一种制备简单、可与常规光纤良好匹配

的高效率、大模场、单模运转的掺镱光纤。本课题组也在不断探索一种新型结构的掺镱光纤。2015年, Wang等^[47-48]提出了一种八角芯掺镱光纤,该光纤的纤芯呈八角形,能够有效抑制部分高阶模,提高激光的光束质量。该光纤制备简单,可与常规光纤完美匹配,尽管无法实现超大模场的单模输出,但通过加入锺环或利用扭转的方式可以进一步抑制高阶模的产生,为其他新型单模运转光纤提供了思路。根据模式不稳定源于热致长周期光栅, Otto等^[49]利用声光偏转器在光纤内激发出两个相位差为 π 的长周期光栅,从而削弱长周期光栅的影响,提高了模式不稳定的阈值功率。

目前,关于模式不稳定现象还存在不少理论和技术问题。对于干涉模式和折射率光栅相位差的产生机理以及冷却方式对模式不稳定阈值的影响仍需进一步研究。未来的研究应侧重于模式不稳定的抑制方案上,诸如新型结构光纤的设计、量子亏损的减少以及光纤散热方式的优化等。

5 结 论

随着高功率光纤激光器输出功率的不断提高及其应用的不断拓展,高功率掺镱光纤已成为业内的研究热点之一。为满足诸多实际应用的要求,高功率光纤激光器应具有高标准的热稳定性、功率稳定性以及模式稳定性,这也是目前需攻克的主要难题。今后,关于高功率掺镱光纤方面的研究方向为:寻求更加稳定、更加简化且杂质更少的制备光纤工艺;不断优化光纤组分各掺杂元素的配比,以满足掺镱光纤对光子暗化、NA、损耗等方面的要求;设计光纤结构要以降低光纤的模式数量为目的,探索更加优化、简单的光纤结构;理论上对光子暗化效应的产生及其抑制机理以及模式不稳定产生机理的深入探索仍将继续。

参 考 文 献

- [1] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32: 36-39.
- [2] Snitzer E. Optical maser action of Nd^{3+} in a barium crown glass[J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(12): 444-446.
- [3] Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [4] Poole S B, Payne D N, Fermann M E. Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(17): 737-738.
- [5] Mears R J, Reekie L, Poole S B, *et al.* Neodymium-doped silica single mode fibre lasers[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(17): 738-740.
- [6] Jeong Y, Sahu J, Payne D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [7] 光纤激光器的输出功率日益提升[OL]. [2016-09-12]. http://www.newmaker.com/art_36629.html.
- [8] Sekiya E H, Barua P, Saito K, *et al.* Fabrication of Yb-doped silica glass through the modification of MCVD process[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(42): 4737-4742.
- [9] Petita V, Sekiya E H, Okazakia T, *et al.* Improvement of Yb^{3+} doped optical fiber preforms by using MCVD method[C]. *SPIE*, 2008, 6998: 69980A.
- [10] Webb A S, Boyland A J, Standish R J, *et al.* MCVD in-situ solution doping process for the fabrication of complex design large core rare-earth doped fibers[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010, 356(18-19): 848-851.
- [11] Leich M, Just F, Langner A, *et al.* Highly efficient Yb-doped silica fibers prepared by powder sinter technology[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1557-1559.
- [12] Yoo S, Basu C, Boyland A J, *et al.* Photodarkening in Yb-doped aluminosilicate fibers induced by 488 nm irradiation[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(12): 1626-1628.
- [13] Dragic P D, Carlson D C, Croteau A. Characterization of defect luminescence in Yb doped silica fibers: Part I NBOHC[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4688-4697.
- [14] Dragic P D, Liu Y S, Galvin T C, *et al.* Ultraviolet absorption and excitation spectroscopy of rare-earth-doped glass fibers derived from glassy and crystalline preforms[C]. *SPIE*, 2012, 8237: 82370T.
- [15] Engholm M, Norin L, Aberg D. Strong UV absorption and visible luminescence in ytterbium-doped aluminosilicate glass under UV excitation[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(22): 3352-3354.
- [16] Engholm M, Norin L. Preventing photodarkening in ytterbium-doped high power fiber lasers; correlation to the UV-transparency of the core glass[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1260-1268.
- [17] Engholm M, Norin L. Comment on "Photodarkening in Yb-doped aluminosilicate fibers induced by 488 nm irradiation"

- [J]. Optics Letters, 2008, 33(11): 1216.
- [18] Guzman Chávez A D, Kir'yanov A V, Barmenkov Y O, *et al.* Reversible photo-darkening and resonant photo-bleaching of ytterbium-doped silica fiber at in-core 977-nm and 543-nm irradiation[J]. Laser Physics Letters, 2007, 4(10): 734-739.
- [19] Kitabayashi T, Ikeda M, Nakai M, *et al.* Population inversion factor dependence of photodarkening of Yb-doped fibers and its suppression by highly aluminum doping[C]. CLEO, 2006: OThC5.
- [20] Morasse B, Chatigny B, Gagnon E, *et al.* Low photodarkening single cladding ytterbium fibre amplifier[C]. SPIE, 2007, 6453: 64530H.
- [21] Shubin A V, Yashkov M V, Melkumov M A, *et al.* Photodarkening of aluminosilicate and phosphosilicate Yb-doped fibers[C]. CLEO, 2007: CJ3-1-THU.
- [22] Peretti R, Jurdyc A M, Jacquier B, *et al.* How do traces of thulium explain photodarkening in Yb doped fibers?[J]. Optics Express, 2010, 18(19): 20455-20460.
- [23] Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, *et al.* Evidence of Tm impact in low-photodarkening Yb-doped fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7590-7598.
- [24] Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, *et al.* Efficient Yb laser fibers with low photodarkening by optimization of the core composition[J]. Optics Express, 2008, 16(20): 15540-15545.
- [25] Engholm M, Jelger P, Laurell F, *et al.* Improved photodarkening resistivity in ytterbium-doped fiber lasers by cerium codoping[J]. Optics Letters, 2009, 34(8): 1285-1287.
- [26] Engholm M, Norin L. Ytterbium-doped fibers co-doped with cerium: next generation of fibers for high power fiber lasers?[C]. SPIE, 2010, 7580: 758008.
- [27] Hönninger I M, Boulet J, Cardinal T, *et al.* Photodarkening and photobleaching of an ytterbium-doped silica double-clad LMA fiber[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1606-1611.
- [28] Piccoli R, Gebavi H, Lablonde L, *et al.* Evidence of photodarkening mitigation in Yb-doped fiber lasers by low power 405 nm radiation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 26(1): 50-53.
- [29] Piccoli R, Robin T, Brand T, *et al.* Effective photodarkening suppression in Yb doped fiber lasers by visible light injection[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7638-7643.
- [30] Gebavi H, Taccheo S, Lablonde L, *et al.* Mitigation of photodarkening phenomenon in fiber lasers by 633 nm light exposure[J]. Optics Letters, 2013, 38(2): 196-198.
- [31] Zhao N, Xing Y B, Li J M, *et al.* 793 nm pump induced photo-bleaching of photodarkened Yb³⁺-doped fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 25272-25278.
- [32] Jasapara J, Andrejco M, Digiovanni D, *et al.* Effect of heat and H₂ gas on the photo-darkening of Yb³⁺ fibers[C]. CLEO, 2006: CTuQ5.
- [33] Basu C, Yoo S, Boyland A J, *et al.* Influence of temperature on the post-irradiation temporal loss evolution in Yb-doped aluminosilicate fibers, photodarkened by 488 nm CW irradiation[C]. CLEO, 2009.
- [34] Leich M, Röpke U, Jetschke S, *et al.* Non-isothermal bleaching of photodarkened Yb-doped fibers [J]. Optics Express, 2009, 17(15): 12588-12593.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Wirth C, Schreiber T, Rekas M, *et al.* High-power linear-polarized narrow linewidth photonic crystal fiber amplifier [C]. SPIE, 2010, 7580: 75801H.
- [41] 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.
- [42] Dong L, Peng X, Li J. Leakage channel optical fibers with large effective area[J]. Journal of the Optical Society of

- America B, 2007, 24(8): 1689-1697.
- [43] Dong L, Wu T W, McKay H A, *et al.* All-glass large-core leakage channel fibers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(1): 47-53
- [44] Liu C H, Chang G q, Litchinitser N, *et al.* Chirally coupled core fibers at 1550-nm and 1064-nm for effectively single-mode core size scaling[C]. CLEO, 2007: CTuBB3.
- [45] Craig Swan M, Liu C H, Guertin D, *et al.* 33 μm core effectively single mode chirally coupled core fiber laser at 1064-nm[C]. OFC/NFOEC, 2008: OWU2.
- [46] Karow M, Zhu C, Kracht D, *et al.* Fundamental Gaussian mode content measurements on active large core CCC fibers [C]. CLEO EUROPE/IQEC, 2013.
- [47] Wang Y B, Liao L, Zhao N, *et al.* Experimental demonstration of optical fiber laser with octagonal-shaped core[J]. Applied Physics A, 2015, 119(2): 791-794.
- [48] Wang Y B, Nan Z, Lei L, *et al.* A new type of Yb^{3+} doped fiber with an octagonal-shaped core[C]. CLEO, 2015: JTh2A.26.
- [49] Otto H J, Jauregui C, Stutzki F. Controlling mode instabilities by dynamic mode excitation with an acousto-optic deflector[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 17285-17298.