

大功率大模场光纤激光器高阶模抑制技术的研究进展

陈明^{1,2} 李剑峰¹ 王屹山² 赵卫²

¹ 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054

² 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 大模场光纤可以降低纤芯功率密度及提高非线性效应的阈值,是进一步提高光纤激光器功率的重要技术途径,但随着纤芯的增大,光纤中将产生多横模运转,降低光束质量。对国内外大模场光纤激光器中的高阶模抑制技术的研究进展进行详细的介绍。对大模场光纤激光器模式控制的发展前景进行了展望。

关键词 光纤激光器;大模场;模式竞争;高阶模抑制

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.080002

Progress of High-Order Mode-Suppression Technology in High-Power Large Mode Field Fiber Lasers

Chen Ming^{1,2} Li Jianfeng¹ Wang Yishan² Zhao Wei²

¹ School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

² State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract Large-mode field fiber can decrease the power density of fiber core and increase the threshold of nonlinear effect, which is the best candidate for high-power fiber lasers. However, an increase in fiber core size will lead to the multimode running and decrease of beam quality. The latest progress of high-order mode-suppression technology is introduced. The development trends of mode suppression technology are prospected.

Key words fiber laser; large mode field; mode competition; high-order mode suppression

OCIS codes 140.3510; 140.3460

1 引言

大功率光纤激光器以其光束质量好、体积小、转换效率高和散热效果好等优点,在制造工业、军事和生物医疗中有着重要的应用。在制造工业中,它可作为结构紧凑、使用方便的高强度光源,用于切割、打孔等。在军事领域,它可以用于车载、机载激光武器,也可作为激光武器的信标光源,并且在光电对抗、激光制导和激光诱导核聚变等领域也有广泛应用。近年来,光纤激光器的输出功率迅速提高,2009年,IPG公司研制了单模输出功率达10 kW,多模输出达到50 kW的掺Yb³⁺光纤激光器^[1]。2009年12月,中国科学院西安光学

收稿日期: 2012-01-30; 收到修改稿日期: 2012-03-16; 网络出版日期: 2012-05-31

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61107037)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLST201002)、中国博士后科学基金(20090451417)、中国博士后特别资助项目(201003693)和中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2009J053)资助课题。

作者简介: 陈明(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面和光纤传感器等方面的研究。

E-mail: chy132138@126.com

导师简介: 李剑峰(1982—),男,博士,副教授,主要从事光纤激光器和传感器等方面的研究。

E-mail: lijianfeng@uestc.edu.cn(通信联系人)

精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室大功率光纤激光研究团队在全光纤激光技术研究方面取得重要阶段性进展,输出功率超过 1000 W,光-光转换效率为 62%^[2]。

随着研究的不断深入,光纤激光的功率、光束质量和亮度等特性的提高变得更为重要,然而进一步增大光纤激光器的功率仍面临着各种非线性效应和光学损伤阈值的挑战。目前,采用大模场光纤以降低纤芯功率密度,是抑制受激拉曼散射、受激布里渊散射和自相位调制等非线性效应,以及增大光学损伤阈值最直接有效的措施^[3,4]。但在增大芯径的同时,导致纤芯中出现多模式传输,输出激光光束质量也将随之下降。在大芯径光纤激光器中,相应地减小纤芯数值孔径(NA),可以提高光束质量。由于材料限制,在保证单模输出的情况下,普通掺杂光纤纤芯的数值孔径只能减小到 0.05,相应的芯径只能增大到 30 μm ^[5]。此外,数值孔径的减小会降低光纤对光束的束缚力,增大损耗以及激光器的不稳定性^[6,7]。所以,增大纤芯直径将不可避免地出现多模运转。因此,光纤激光器高阶模抑制技术对于高功率光纤激光器的发展至关重要。

2 大模场光纤激光器高阶模抑制的研究进展

为提高高功率大模场光纤激光器的光束质量,国内外研究人员采用了多种方法抑制激光器中的高阶模,其主要技术途径包括基于双包层多模光纤的模式控制和光子晶体光纤(PCF)两类。

2.1 基于双包层多模光纤的模式控制

对于双包层多模光纤来讲,模式控制方法主要有弯曲选模、模式转换、锥形光纤选模和增益-损耗控制以及复合导引技术等。

2.1.1 弯曲选模法

根据 Marcuse^[8]的弯曲损耗理论,当光纤弯曲时,越靠近弯曲外侧的电磁波的相速度越大,在某一点相速度会超过光纤中的光速,将部分能量辐射出去,所以沿着弯曲半径方向,纤芯中的束缚模式会发生不同程度的辐射,称为弯曲损耗。在相同的条件下,高阶模的弯曲损耗大于基模。因此,选择合适的弯曲半径可以抑制高阶模式传输,达到基模输出目的。

2000年,Koplow等^[9]将多模掺镱双包层光纤(纤芯直径 25 μm , $NA \approx 0.1$)缠绕在一个圆形轴上,通过调整不同的弯曲半径,实现对基模的低损耗和高阶模的高损耗,首次获得了单模输出(光束质量因子 $M^2 = 1.09$)。2005年,Carter等^[10]将芯径 30 μm , $NA = 0.06$ 的线性结构光纤(理论上可以支持 5 种模式)弯曲到半径为 50 mm 时,实现了 LP_{11} 模 50 dB/m 的损耗,而 LP_{01} 模只有 0.01 dB/m,不仅没有影响输出功率,而且提高了激光器的斜率效率。2009年,Donlagic^[11]设计了一个与半径 50 μm 的标准多模渐变折射率光纤相匹配的高弯曲度多模光纤传输系统。传输光纤被弯曲成特定的轮廓,只有弯曲耐受性高的模式才能有效增益,高阶模的增益被抑制。当光纤围绕半径 1.25 mm 的圆柱缠绕 10 圈时,输出损耗低于 0.05 dB/m,甚至比单模光纤的输出效果还要好。

在弯曲选模的基础上,Soh等^[12]提出在光纤拉制时就人为地将纤芯拉制成螺旋状,将包层内纤芯制作成螺旋形状的光纤结构(图 1),该光纤无需缠绕即可实现弯曲选模。

2004年,Wang等^[13]报道了利用螺旋形双包层光纤来实现单模输出,该螺旋形双包层光纤纤芯直径为 26 μm , $NA = 0.14$ (在工作波长为 1047 nm 处的归一化频率约为 11),内包层直径为 400 μm ,光纤长为 3 m。当抽运功率为 2.2 W 时,光纤激光器的输出功率为 350 mW,光束质量因子 $M^2 < 1.1$ 。2006年,Wang等^[14]

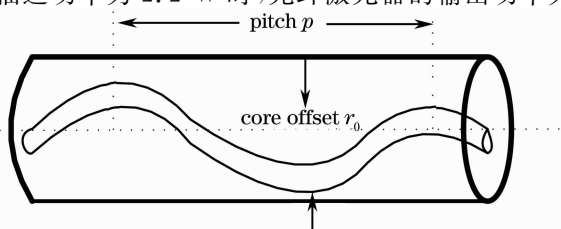


图 1 螺旋芯双包层光纤示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a helical-core double-clad fiber

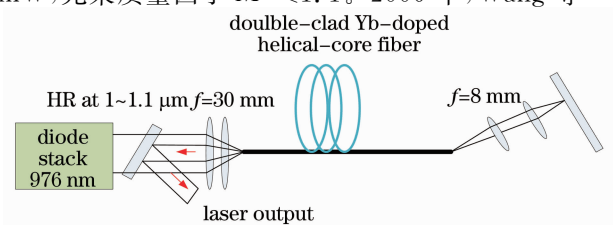


图 2 包层抽运掺 Yb³⁺螺旋形光纤激光器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the cladding pumped Yb-doped helical-core fiber laser

使用螺旋形双包层光纤(纤芯直径为 $30\ \mu\text{m}$, $NA=0.087$, 弯曲周期为 $8.5\ \text{cm}$)实现了 $60.4\ \text{W}$ 的单模激光输出,光束质量因子 $M^2 < 1.4$,斜率效率达到 84% ,其实验装置如图 2 所示。

2.1.2 模式转换法

光纤中的两个不同传输模式,受到周期性折射率的调制,当失谐量和光纤结构参数达到谐振条件时,这两种模式发生耦合,导致模式之间的转换。基于光纤中的这种模式耦合作用,研究人员提出了模式转换法来抑制高阶模传输。

2007 年前后, Liu 等^[15,16]提出了一种新型的大模面积光纤设计方案——手征性耦合芯径(CCC)光纤,其基本结构如图 3 所示,在一根大模面积光纤中心纤芯周围以一定的周期缠绕着螺旋型的卫星纤芯,可通过设计纤芯尺寸、缠绕周期等,有选择地将中心纤芯中的高阶模耦合到卫星纤芯中,实现高阶模与基模之间的模式转换,从而使得只有 LP_{01} 模在中心纤芯中传输。Liu 等^[16]制作了中心纤芯直径为 $35\ \mu\text{m}$, $NA=0.07$, 卫星纤芯直径为 $12\ \mu\text{m}$, $NA=0.09$ 的 CCC 光纤。在波长大于 $1550\ \text{nm}$ 的光纤激光器中,高阶模损耗值为 $130\sim 300\ \text{dB/m}$, LP_{01} 模损耗小于 $0.3\ \text{dB/m}$ 。在光纤长 $25\ \text{cm}$ 、波长 $1550\ \text{nm}$ 的光纤激光器中,输出光束质量因子 $M^2=1.03$,基模损耗只有 $0.095\ \text{dB/m}$ 。根据实验结果预测单模输出的 CCC 光纤的纤芯直径可以超过 $100\ \mu\text{m}$ 。

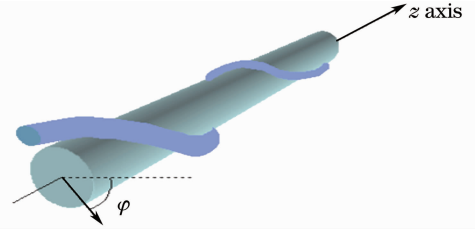


图 3 旋光性耦合光纤示意图

2009 年, Huang 等^[17]采用高亮度的 $200\ \mu\text{m}$, $NA=0.2$ 的光纤耦合半导体激光器抽运长 $1.5\ \text{m}$ 、直径为 $35\ \mu\text{m}$ 的掺 Yb^{3+} 双包层 CCC 光纤,实现了 $250\ \text{W}$ 的单模激光输出,斜率效率为 74% 。2011 年, Lefrancois 等^[18]首次采用掺 Yb^{3+} 的 CCC 光纤制作了锁模激光器,实现了单模运转,脉冲能量和宽度分别为 $40\ \text{nJ}$ 和 $200\ \text{fs}$ 。

此外, Ramachandran 等^[19]提出了一种利用长周期光栅(LPG)实现模式转换的方法。如图 4 所示,在一段特殊的高阶模光纤两端连接 LPG,基模经过 LPG1 时转换为高阶模 LP_{07} , LP_{07} 经过特殊的高阶模光纤传输到 LPG2 后,再转换回基模输出。 LP_{07} 模具有较大的模场面积,在光纤中可以忽略随着距离而产生的电磁场衰减,实现了大模面积的基模输出。2006 年,该研究团队制作了 $5\ \text{m}$ 长的高阶模 LPG 光纤,获得了有效模面积 $2100\ \mu\text{m}^2$ 、峰值功率 $61\ \text{kW}$ 的飞秒脉冲输出^[20]。2009 年,他们利用高阶模光纤实现了增益信号在光纤中以单一模式传输,获得了有效模场面积超过 $3200\ \mu\text{m}^2$ 的激光输出^[21],可以忽略因折射率分布不均匀或者微扰引起的能量转移到其他模式的光纤长度达到 $50\ \text{m}$ 。

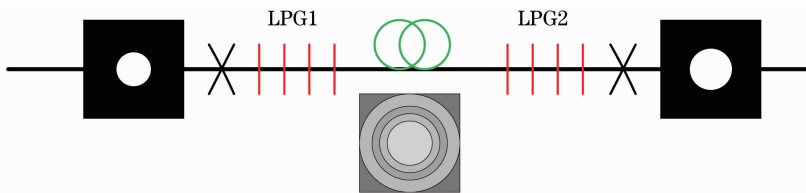


图 4 LPG 模式转换法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the mode conversion method by long-period gratings

2.1.3 光纤拉锥法

Haas 等^[22]提出模式滤波器理论,即将单模光纤直接焊接在一根多模光纤的两端,由于纤芯的直径不同,模式滤波器在光纤连接处产生高的损耗。光纤结构决定其纤芯能传导的模式,芯径的变化会引起高阶模式的损耗。由此,在光纤激光系统中加入一段锥形光纤则可以有效提高输出激光的光束质量。

1999 年,英国南安普敦大学的研究人员首次采用光纤拉锥法实现了大模场多模光纤激光器的准单模输出,光纤的输出端被拉成锥形,拉锥区长约 $3\ \text{cm}$,最小直径 $70\ \mu\text{m}$ ^[23]。拉锥后光纤激光器的斜率效率由 85% 变为 67% ,光束质量因子 M^2 由 2.6 变为 1.4 ,最大输出功率由 $11\ \text{W}$ 降低为 $9\ \text{W}$ 。尽管最大功率损失了 20% ,但其亮度增大为拉锥前的 3.5 倍。他们将大芯双包层掺 Yb 光纤进行拉锥,在拉锥区域内纤芯变细,抑制了光纤内的高阶模振荡,从而提高了输出光束质量。2007 年,中国科学院上海光学精密机械研究所在国内首先进行了锥形光纤选模的实验^[24],纤芯直径 $26\ \mu\text{m}$,光纤进行拉锥处理后,其纤芯直径最小处约为

9 μm ,拉锥区长度约为 15 mm,拉锥区的光纤如图 5 所示,拉锥后最大输出功率减小了约 30.6%,但其光束亮度约为拉锥前的 5.26 倍。

2009 年,Filippov 等^[25]设计了一种纵向不对称拉锥双包层光纤,拉锥率随光纤长度增大,获得了 600 W 的单模激光输出,斜率效率达 63%,光束质量因子 $M^2=1.07$ 。2010 年,他们对比使用了凹面、凸面和线性轮廓的 3 种不同拉锥比例的双包层拉锥光纤^[26],实验装置如图 6 所示。915 nm 的高功率抽运光经直径 600 μm 、 $NA=0.22$ 的尾纤耦合进双包层拉锥光纤,结果表明拉锥比例 5.6、吸收系数 1.2 dB/m 的凸面形光纤输出了功率 750 W 的单模激光,斜率效率达到 81.9%,光束质量因子 $M^2=1.7$ 。

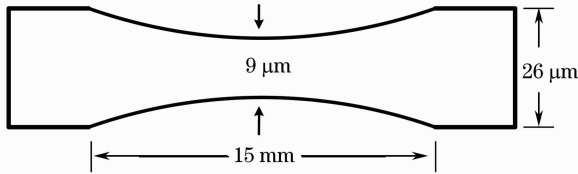


图 5 拉锥光纤结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of a tapered fiber

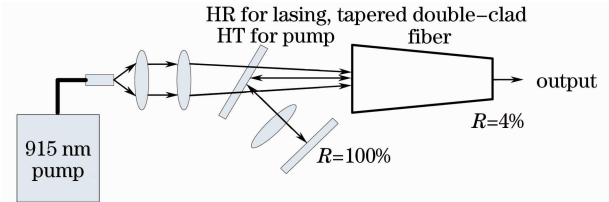


图 6 双包层拉锥光纤激光器实验结构示意图

Fig. 6 Experimental setup of tapered double-clad fiber laser

2.1.4 “增益”控制技术

光纤截面上不同模式的模场分布存在差异,通过控制光纤掺杂离子的分布和区域,可以使光纤中高阶模与基模的增益和损耗系数存在较大差异,达到抑制高阶模的选模目的,这种方法称为“增益”控制^[27]。该方法不仅无须施加外部控制,而且对工作环境要求较低。2001 年,Limpert^[27]对“增益”控制方法进行了数值分析,在折射率差为 3×10^{-3} 、 $NA=0.093$ 、纤芯直径为 50 μm 的大芯径多模阶跃型光纤中,当 LP_{01} 模的增益为 3.33 m^{-1} 时,最佳区域掺杂半径为 16.9 μm ,高阶模的损耗达到 0.7 dB/m。图 7 为该增益光纤中的模式抑制和增益半径关系图,横坐标对应光纤截面上径向位置,着色方框对应纤芯区域;而“gain”和“loss”区域分别对应增益和损耗介质掺杂区域。

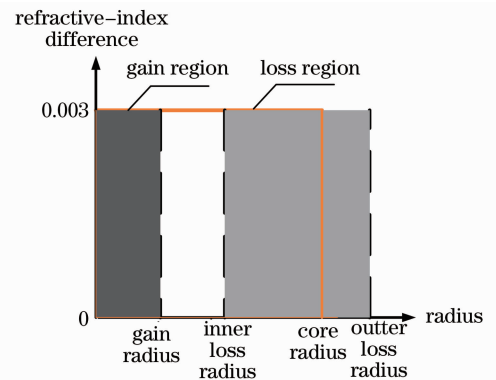


图 7 增益控制的多模光纤示意图

Fig. 7 Scheme diagram of a gain and loss managed multimode fiber

2005 年,Cheng 等^[28]报道了级联主振荡功率放大(MOPA)实验,对芯径 200 μm 的主放大级增益介质光纤中直径 100 μm 的区域进行了稀土掺杂,起到了抑制高阶模的作用。2006 年,Hotoleanu 等^[29]模拟了通过“增益”控制技术实现大模场光纤中高阶模的抑制,光纤为纤芯直径 25 μm 、内包层直径 125 μm 、 $NA=0.06$ 的双包层掺杂光纤,对比了不同掺杂分布的掺 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 光纤的输出模式功率比,结果表明“增益”控制技术能够很好地抑制高阶模。2008 年,袁艳阳等^[30]提出了任意折射率分布和掺杂分布光纤的有效模面积和基模提取效率的计算方法,通过对比分析典型折射率分布和掺杂分布的光纤性能,表明减小掺杂半径或者采用非均匀掺杂可进一步提高基模有效模面积和光束质量,模场面积可达 2168 μm^2 。2010 年,陈爽等^[31]根据大芯径多模双包层光纤放大器的工作原理,通过改变纤芯中掺杂的浓度、区域和材料,控制纤芯中各个模式的激光增益大小从而进行模式控制,实现输出基模功率百分比大于 95%,有效地抑制了高阶模。

2.1.5 复合导引技术

2003 年,Siegman^[32]创新了传统“折射率导引”的设计方法,提出了光纤导引法——“增益导引”,利用折射率反导引和增益导引的原理,使纤芯的折射率比包层的低,不同模式在光纤内具有不同的增益和损耗,从而达到高阶模式抑制的目的。增益导引光纤有较高的单模束缚能力,理论分析表明基模模场直径可达 100 μm 。基于这种光纤,可获得单模传输、高束缚、大芯径和有效抑制高阶模的光纤激光器。

2006 年,Siegman 等^[33]设计了长 10 cm 的掺 Nd^{3+} 增益导引光纤,掺 Nd^{3+} 纤芯直径为 100 μm 、折射率

为 1.5734, 纤芯折射率比包层低约 0.35%, 采用脉冲 Xe 灯进行抽运, 抽运功率约为 76 J 时, 获得 0.75 mJ 的 1052 nm 激光输出, 光束质量因子 $M^2 \leq 2$ 。2007 年, Chen 等^[34]进行了一系列的研究, 构建了增益导引折射率反导引(GG+IAG)大模面积光纤激光器实验系统, 通过掺 Nd^{3+} 增益导引光纤(反折射率导引纤芯 $100 \mu\text{m}$), 获得基模激光输出。他们进一步指出该技术可以将基模直径扩展至 $200 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m}$ 甚至 $400 \mu\text{m}$ ^[35]。2008 年, Sudesh 等^[36]用二极管抽运芯径 $200 \mu\text{m}$ 的增益导引折射率反导引掺 Nd^{3+} 光纤得到了近高斯光束, 实验装置如图 8 所示。

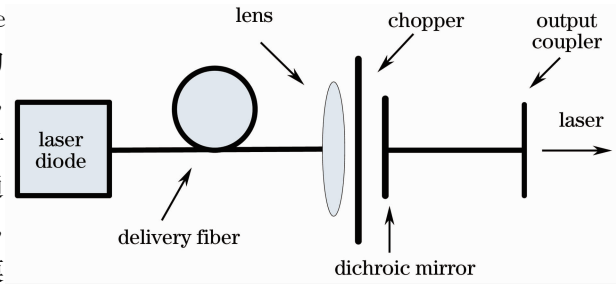


图 8 激光二极管端面抽运大芯径 GG+IAG 光纤激光器装置的示意图

Fig. 8 Scheme diagram of the laser-diode end-pumped very large diameter core GG+IAG fiber laser setup

2010 年, Hageman 等^[37]报道了 GG+IAG 掺 Nd^{3+} 磷酸盐光纤激光器, 纤芯直径为 $100 \mu\text{m}$, 光纤长 4 cm, 抽运功率为 200 W, 抽运源波长为 808 nm, 输出耦合器反射率 33%, 输出的脉冲能量为 18 mJ, 斜率效率为 4.3%, 光束质量因子 M^2 接近 1.4, 获得了近高斯波形的单模激光。

还有一种抑制高阶模的方法是把大芯径光纤激光谐振腔腔镜的反射面上各点的切线方向设置成与光纤轴线垂直面具有一倾斜角度, 使经过该反射面的任何可导引的低阶模和高阶模经过其反射后, 高阶模被抑制, 低阶模被振荡输出, 从而提高大芯径光纤激光器输出的光束质量^[38]。也可改变光纤端面为非平面, 例如凸面^[39], 光纤模式在非平面的端面反射作用下, 各个模式的反射率将发生变化, 影响到模式在光纤中的产生和传输, 实现对光纤模式的选择, 提高输出激光的光束质量。

2.2 光子晶体光纤

光子晶体光纤又被称为微结构光纤或多孔光纤, 由单一介质(通常为熔融硅或聚合物)构成, 包层由在二维方向上紧密排列(周期性六边形)而在光纤轴向基本保持不变的波长量级的空气孔组成, 纤芯由中心缺失的空气孔或者石英介质组成。1996 年, 英国 Bath 大学的 Knight 等^[40]制作了世界上第一根光子晶体光纤。光子晶体光纤可在较宽的波长区域内实现单模传输, 因此具有无截止单模的特性^[41]。而且这种微结构特性与光纤绝对尺寸无关, 因此通过改变空气孔间距能有效提高等效传输模面积, 光子晶体光纤仍可保持单模传输。

大模场光子晶体光纤的设计可以归结为两类, 即棒状光纤^[42]和泄漏通道光纤^[43], 都保留了 PCF 典型的六角形结构。两种设计可统称为大节距光子晶体光纤^[44](LPF), 它们的孔距 Λ 是波长 λ 的 10 倍。2004 年, Wadsworth 等^[45]利用大模面积空气包层 PCF 研制的高功率 PCF 激光器, PCF 纤芯直径为 $15 \mu\text{m}$, $NA > 0.8$, 掺杂纤芯采用了偏芯设计, 其结构为双程线性腔结构, 最大输出功率 3.9 W, 斜率效率 30%, 并实现单横模运转。2006 年, Limpert 等^[46]制作出迄今为止最大单模纤芯直径的 PCF, 纤芯直径 $60 \mu\text{m}$, 基模模式面积 $2000 \mu\text{m}^2$ 。抽运包层数值孔径在波长 976 nm 时 $NA \approx 0.6$ 。当抽运功率为 550 W/m 时, 连续波输出激光 320 W。2009 年, Saitoh 等^[47]测试了一种新型的玻璃 LPF, 实现了 $1400 \mu\text{m}^2$ 的有效模场面积。他们发现拥有 7 个硅芯和两种不同直径的掺氟硅棒对称排列在硅芯两侧的 LPF, 如图 9 所示, 芯径达到 $50 \mu\text{m}$ 时, 也能实现有效的单模运转, 工作波长为 1064 nm、弯曲半径为 15 cm 时损耗低至 0.5 dB/m。

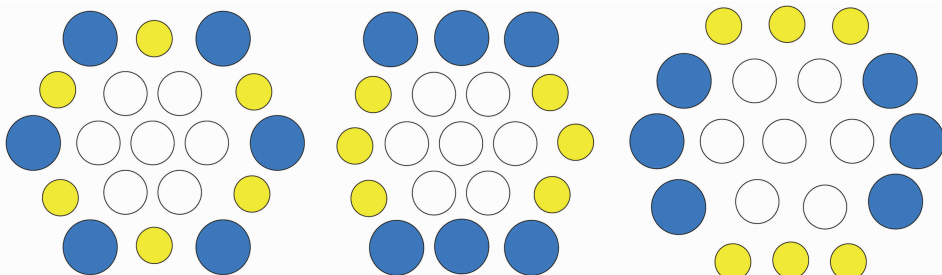


图 9 LCF 结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of LCF

2011年, Stutzki等^[48]对使用双环孔 LPF 的大功率超大模场面积的光纤放大器进行实验。实验光纤长度为 1.2 m, 种子源是中心波长 1042 nm、78 MHz 的脉冲光。表 1 是部分参数和实验结果比较表。实验表明在保持模场直径(MFD) 62 μm 稳定单模运转条件下, 获得的平均输出功率为 294 W。这种大节距光纤可以确保平均功率数百瓦、数毫焦的超短脉冲得以实现。

表 1 LPF1~LPF4 部分参数和实验结果比较^[48]Table 1 Production parameters and experimental results for LPF1~LPF4^[48]

	LPF1	LPF2	LPF3	LPF4
Pitch $\Delta / \mu\text{m}$	30	30	30	30
Relative hole diameter d / Δ	0.11	0.21	0.33	0.40
Simulated MFD / μm	63	49	41	38
Measured MFD / μm	62	50	41	36
Maximum output power / W	294	286	239	206
$M^2 (>200 \text{ W})$	<1.4	<1.4	<1.3	<1.3

3 结束语

可以看出, 光子晶体光纤虽然抑制高阶模式最佳, 但是其制作工艺复杂, 成本较高, 而且使得光纤柔性特性丧失, 且较难实现全光纤结构。弯曲缠绕和拉锥法比较简单, 前者在模式不太多的情况下抑制效果较好, 但是对更大直径的光纤效果有限, 且影响激光的模场; 后者由于纤芯变细, 在高功率下容易损伤。其他方式如螺旋芯光纤、模式转换、“增益-损耗”控制及复合导引方式都需要在制作光纤时采用特殊的制作工艺, 成本较高, 而且单一采用其中一种方法进行高阶模抑制时, 对制作工艺要求较高。因此, 我们认为将以上所介绍的几张方法相结合有利于降低成本和提高抑制效果, 如“增益-损耗”控制+弯曲缠绕(拉锥), 复合导引+弯曲缠绕(拉锥), 螺旋芯光纤+弯曲缠绕(拉锥), 模式转换+弯曲缠绕(拉锥)等, 至于哪种方法最佳还需要进一步的理论分析和实验研究。

总之, 高功率和光束质量的光纤激光器在工业加工、航空航天、科学材料和军事等方面有着重要的应用前景。因此, 在保证光纤激光系统高功率运转的同时, 对光纤中高阶模进行抑制保证高光束质量是十分重要的。在理论方面, 要进一步完善大模场光纤激光器的模式耦合竞争理论, 分析各种因素对模式增益的影响, 以便精确控制激光器的输出特性并对高阶模抑制技术进行正确引导。在高阶模抑制技术方面, 基于双包层光纤的各种模式控制方法与采用光子晶体的方法均存在各自的优缺点, 还未被广泛采用或商用化。将来需要寻找一种更便捷、成本更低的新方法来抑制高阶模。

参 考 文 献

- 1 IPG Photonics. IPG Photonics Successfully Tests World's first 10 Kilowatt Single-Mode Production Laser[EB/OL]. http://www.ipgphotonics.com/collateral/documents/english-us/pr_final_10_kW_sm_laser.pdf, 2009-06-17
- 2 Lark. 西安光机所全光纤激光技术取得重大进展达国内最高水平[OL]. <http://www.ixian.cn/thread-103115-1-1.html>, 2009-12-04
- 3 R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(7): 1049~1056
- 4 A. Carter, B. Samson, K. Tankala *et al.*. Damage mechanisms in components for fiber laser and amplifiers[C]. *SPIE*, 2005, **5647**: 561~571
- 5 J. Limpert, F. Roser, S. Klingebiel *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 537~545
- 6 J. Sakai, T. Kimura. Bending loss of propagation modes in arbitrary index profile optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(10): 1499~1506
- 7 J. M. Fini. Bend-resistant design of conventional and microstructure fibers with very large mode area[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 69~81
- 8 D. Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 216~220
- 9 J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, L. Goldberg. Single mode operation of acoupled multi mode fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7): 442~444

- 10 A. Carter, B. Samson. New technology advances applications for high-power fiber lasers[J]. *Military & Aerospace Electron.*, 2005, **16**(7): 16~21
- 11 D. Donlagic. A low bending loss multimode fiber transmission system[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 22081~22095
- 12 D. B. S. Soh, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Geometrical factor modification of helical-core fiber radiation loss formula[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **222**(1-6): 235~242
- 13 P. Wang, L. J. Cooper, R. B. Williams *et al.*. Helical-core Yb-doped fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(21): 1325~1326
- 14 P. Wang, L. J. Cooper, J. K. Sahu *et al.*. Efficient single-mode operation of a cladding pumped ytterbium-doped helical-core fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 226~228
- 15 C. H. Liu, G. Chang, N. Litchinitser *et al.*. Chirally coupled core fibers at 1550 nm and 1064 nm for effectively single-mode core size scaling[C]. Proc. CLEO/QELS, 2007, CtuBB3
- 16 M. C. Swan, C. H. Liu, D. Guertin *et al.*. 33 μm core effectively single-mode chirally-coupled-core fiber laser at 1064 nm [C]. Proc. OFC/NFOEC, 2008, OWU2
- 17 S. Huang, C. Zhu, C. Liu *et al.*. Power scaling of CCC fiber based lasers[C]. Proc. CLEO, 2009, CTHGG1
- 18 S. Lefrancois, T. S. Sosnowski, C. H. Liu *et al.*. Energy scaling of mode-locked fiber lasers with chirally-coupled core fiber[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(4): 3464~3470
- 19 S. Ramachandran, J. W. Nicholson, S. Ghalmi *et al.*. Light propagation with ultralarge modal areas in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1797~1799
- 20 J. W. Nicholson, S. Ramachandran, S. Ghalmi *et al.*. Propagation of femtosecond pulses in large-mode-area, higher-order-mode fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(21): 3191~3193
- 21 S. Ramachandran, J. M. Fini, M. Mermelstein *et al.*. Ultra-large effective-area, higher-order mode fibers: a new strategy for high-power lasers[J]. *Lasers & Photon. Rev.*, 2009, **2**(6): 429~448
- 22 Z. Haas, M. A. Santoro. A mode-filtering scheme for improvement of the band product in multimode fiber systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(7): 1125~1131
- 23 J. A. Alvarez Chavez, A. B. Grudinin, J. Nilsson. Mode selection in high power cladding pumped fiber laser switch tapered section[C]. CLEO, 1999, 247~248
- 24 L. Li, Q. H. Lou, J. Zhou *et al.*. High power single transverse mode operation of a tapered large-mode-area fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(4): 655~657
- 25 V. Filippov, Y. Chamorovskii, J. Kerttula *et al.*. 600 W power scalable single transverse mode tapered double-clad fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1203~1214
- 26 V. Filippov, J. Kerttula, Y. Chamorovskii *et al.*. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12499~12512
- 27 J. Limpert, H. Zellmer, A. Tünnermann. Suppression of high order modes in a multimode fiber amplifier using efficient gain-loss-management (GLM)[C]. Advanced Solid-State Lasers, 2002. MB20
- 28 M. Y. Cheng, Y. C. Chang, A. Galvanauskas *et al.*. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200 μm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4): 358~360
- 29 M. Hotoleanu, M. Söderlund, D. Kliner *et al.*. High order modes suppression in large mode area active fibers by controlling the radial distribution of the rare earth dopant[C]. SPIE, 2006, **6102**: 61021T
- 30 Yuan Yanyang, Gong Mali. Analysis and design of refractive-index and dopant distributions for large-mode-area fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1355~1359
袁艳阳, 巩马理. 大模面积光纤中折射率和掺杂分布的设计和分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1355~1359
- 31 Chen Shuang, Feng Ying, Wang Ling. Mode control in a multimode fiber amplifier based on gain-loss-management[J]. *Laser Technol.*, 2010, **34**(1): 128~131
陈爽, 冯莹, 王玲. 基于 GLM 的多模光纤放大器模式控制研究[J]. 激光技术, 2010, **34**(1): 128~131
- 32 A. E. Siegman. Propagating modes in gain-guided optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(8): 1617~1628
- 33 A. E. Siegman, Y. Chen, V. Sudesh *et al.*. Confined propagation and near single-mode laser oscillation in a gain-guided index antiguided optical fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(25): 251101
- 34 Y. Chen, V. Sudesh, T. McComb *et al.*. Lasing in a gain-guided index, antiguided fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1683~1688
- 35 Y. Chen, T. McComb, V. Sudesh *et al.*. Very large-core, single-mode, gain-guided, index antiguided fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2505~2507
- 36 V. Sudesh, T. McComb, Y. Chen *et al.*. Diode-pumped 200 μm diameter core, gain-guided, index-antiguided single-mode fiber laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(3): 369~372
- 37 W. Hageman, Ying Chen, Xiangru Wang *et al.*. Scalable side-pumped, gain-guided index-antiguided fiber laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(12): 2451~2459

- 38 Wang Zhijiang, Lou Qihong, Zhou Jun. Large Core Diameter Fiber Laser[P]. Chinese Patent, CN1560966A, 2005-01-05
王之江, 楼祺洪, 周 军. 大芯径光纤激光器[P]. 中国专利, CN1560966A, 2005-01-05
- 39 Li Chen, Liao Suying, Zhou Jie *et al.*. Experimental and theoretical study on mode selection of fiber lasers with convex output end[J]. *Laser Technol.*, 2009, **33**(5): 512~514
李 晨, 廖素英, 周 洁 等. 光纤激光器凸端面选模理论和实验研究[J]. 激光技术, 2009, **33**(5): 512~514
- 40 J. C. Knight, T. A. Birks, D. M. Atkin. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 41 P. St. Russel. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 42 W. S. Wong, X. Peng, J. M. McLaughlin *et al.*. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(21): 2855~2857
- 43 L. Dong, X. Peng, J. Li. Leakage channel optical fibers with large effective area[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1689~1697
- 44 F. Jansen, M. Baumgartl, H. J. Otto *et al.*. Influence of index depressions in active large pitch fibers[C]. CLEO, 2010, CWC6
- 45 W. J. Wadsworth, N. Y. Joly, F. Biancalana *et al.*. Compact supercontinuum generation and four-wave mixing in PCF with 10 ns laser pulses[C]. CLEO, 2004. CThC3
- 46 J. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt *et al.*. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2715~2720
- 47 K. Saitoh, Y. Tsuchida, L. Rosa *et al.*. Design of all-solid leakage channel fibers with large mode area and low bending loss[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(6): 4913~4919
- 48 F. Stutzki, F. Jansen, T. Eidam *et al.*. High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 689~691