

大模场面积光纤单模运转实现方法的研究进展

赵楠 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 非线性效应和光纤损伤是抑制光纤激光器功率提升的主要因素,因此实现单模运转的大模场面积光纤成为国内外研究人员关注的热点。从光纤滤模、光纤结构设计和模式转换三方面出发,详细介绍了当前大模场面积光纤高阶模抑制技术的研究进展,通过对比几种技术方案,对高功率光纤激光器单模运转的发展进行了展望。

关键词 光纤光学; 光纤激光器; 大模场面积; 单模运转

中图分类号 TN244

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.030002

Progress of Single Mode Propagation Technology in Large Mode Area Fiber

Zhao Nan Li Jinyan

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

Abstract Due to nonlinear effects and optical damage which limit the power promotion of fiber lasers, large mode area fiber with single mode propagation has aroused wide public interest over recent years. The latest progress of single mode output technology in large mode area fiber is introduced from three aspects including fiber modes filtering, structure design and modes conversion. The development trends of high power fiber lasers are also prospected by comparing these methods.

Key words fiber optics; fiber lasers; large mode area; single mode propagation

OCIS codes 060.2430; 060.3510; 140.3570; 140.3510

1 引言

光纤激光器因其高转换效率、良好的散热效应、高光束质量及结构紧凑等独特优势而得到迅速发展,广泛应用于光通信、工业加工、生物医疗、军事国防^[1-6]等相关领域,成为激光器产业中的主导力量。近年来,光纤激光器的输出功率不断攀升,达到千瓦量级平均功率及兆瓦量级峰值功率,但是高功率的激光输出会导致纤芯中功率密度过高,易引起严重的受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)等非线性效应及光纤损伤。通常采用大模场面积(LMA)光纤降低纤芯功率密度,从而抑制非线性效应,但这种方法会激发起高阶模(HOM),致使光纤输出光束质量恶化。最初人们通过降低纤芯数值孔径(NA)来实现单模运转,然而受到材料本身性质的限制,普通光纤的数值孔径很难降到0.05以下,且过低的NA会加剧光纤弯曲损耗^[7-9]。因此,设计新型大模场面积光纤并有效抑制高阶模式从而实现高功率单横模运转成为国内外研究人员所关注的热点。

在高功率大模场面积单模输出光纤激光器的研究方面,美国IPG公司、OFS实验室、密歇根大学、克莱姆森大学、英国南安普顿大学、德国耶拿大学等机构一直处于国际领先地位,光纤芯径从最初的30 μm提升到100 μm以上。大模场面积光纤的实现大致可分为三类:1)利用滤模效应,将光纤中的高阶模从纤芯滤

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-10-13; 网络出版日期: 2015-02-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2014TS018)、武汉光电国家实验室主任基金

作者简介: 赵楠(1991—),女,博士研究生,主要从事新型光纤及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: nangua0809@163.com

导师简介: 李进延(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事新型光纤材料与器件、掺稀土光纤、光纤激光器、光纤放大器、光子晶体光纤等领域方面的研究。E-mail: lji@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

除;2)重新设计光纤的结构,通过改变纤芯或包层的折射率分布并改进纤芯的掺杂分布,突出基模的增益优势,达到增大模场面积、抑制高阶模的目的;3)利用模式转换等机制,有效滤除高阶模,实现单模运转,并确保系统的稳定性。

2 大模场面积单模运转光纤研究进展

2.1 光纤滤模技术

2.1.1 弯曲选模

1976年, Marcuse^[9]在提出了弯曲损耗理论模型,指出当光纤弯曲时光纤内模式的部分能量会以辐射形式损耗掉,且这种损耗随着模式阶数的增加而增大,因此利用基模与高阶模弯曲损耗的差异可以实现滤除高阶模的效果。2000年, Koplow等^[10]将长为6 m,芯径为25 μm 的双包层掺镱光纤缠绕在两个直径为1.58 cm的正交线轴上,获得了64%的激光放大效率,且实现了单模输出(光束质量因子 $M^2 \approx 1.09$)。2005年, Carter等^[11]以5 cm为直径弯曲30 μm 纤芯,数值孔径 $NA=0.06$ 的光纤,观察到基模损耗在0.01 dB/m左右,而高阶模损耗则超过了50 dB/m。2007年, Li等^[12]同样将16 μm 芯径, $NA=0.1$ 的掺镱光纤盘绕成2 cm直径的光纤环,得到了光束质量因子 M^2 为1.03的单模激光输出。2008年,该研究机构利用芯径为26 μm ,数值孔径 NA 为0.1的掺镱双包层光纤,以不同盘绕直径进行光纤激光测试实验,结果表明随着弯曲半径的减小,激光输出功率有所下降,而光束质量得到提高,18 W的抽运功率最高可得到5 W激光输出^[13]。

2003年, Wang等^[14]报道了一种如图1(a)所示的螺旋芯光纤,这种光纤将弯曲因素内置于纤芯,将纤芯拉制成螺旋形状,这样光纤无需盘绕便能滤除高阶模。Wang以26 μm 芯径的螺旋芯光纤搭建激光器平台[如图1(b)所示,HR为高反, T 为透射率, f 为透镜的焦距],在2.2 W抽运功率下得到350 mW激光输出,对应17%斜率效率,光束质量因子 M^2 小于1.1,实验还测得该光纤具有保偏特性,消光比达到13 dB。2006年, Wang等^[15]将螺旋芯光纤芯径做到30 μm ,激光输出功率提高至60.4 W并获得84%的高斜率效率,输出光束近似单模($M^2 < 1.4$)。同年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Zhao等^[16]利用 Marcuse给出的辐射损耗公式对螺旋芯光纤进行数值模拟,指出通过合理设计光纤结构,可实现300 μm 芯径的大模场面积光纤,同时保持稳定的单模输出。

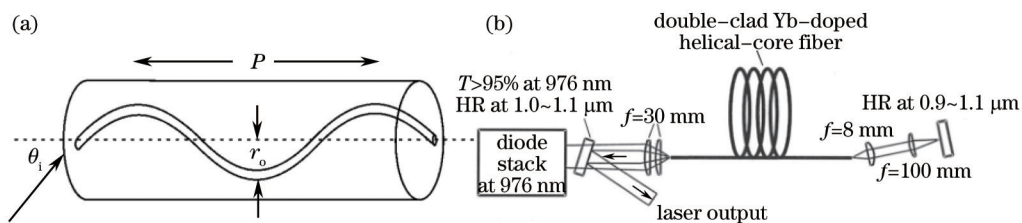


图1 (a) 螺旋芯光纤结构示意图; (b) 掺镱螺旋芯光纤激光器实验装置图

Fig.1 (a) Schematic diagram of a helical-core fiber; (b) Yb-doped helical-core fiber laser set-up

2.1.2 泄漏通道光纤与大节距光纤

2005年, Wong等^[17]设计出纤芯由一圈大空气孔围成的泄漏通道光纤(LCF),光纤端面如图2(a)所示,这种光纤的空气孔直径达到工作波长的几十倍,空气孔之间的通道连接光纤的纤芯和包层,形成一个模式筛,高阶模被泄露到包层中,而基模则可以在纤芯中稳定传输,同时兼具抗弯曲损耗的特性。该LCF光纤的模场面积达到1417 μm^2 , M^2 为1.15,实现了单模输出。2006年, Dong等^[18]在LCF光纤模场面积方面实现了新的突破,其模场面积可做到3160 μm^2 ,通过测试该光纤的激光性能,得到了阈值功率为9 W,斜率效率为60%, M^2 为1.3的良好结果。2009年, Dong等^[19]将光纤中的空气孔由掺氟的玻璃棒代替,形成全玻璃化泄漏通道光纤,提高了抽运光的吸收效率,降低损耗,以该光纤进行皮秒脉冲激光放大实验,得到230 kW激光峰值功率,输出模场直径达64 μm , M^2 为1.35。2011年, Stutzki等^[20]报道了一种如图2(b)所示的大节距光纤(LPF),其工作原理与LCF类似,对该光纤进行激光放大,实验得到最高294 W的平均输出功率,且保持稳定的单模运转,模场直径约为62 μm 。2012年, Limpert等^[21]又实现了芯径为135 μm ,模场直径为100 μm 的掺镱LPF光纤,通过搭建调Q放大装置,可得到脉冲能量为26 mJ,平均功率为130 W的基模输出。2013年, Stutzki等^[22]制备出81 μm 纤芯的大模场面积掺镱LPF光纤,模场直径为65 μm ,以双端抽运方式对LPF进行

脉冲振荡,输出脉冲峰值功率为 150 kW,对应 24 mJ 脉冲能量,15 ns 脉宽,脉冲平均功率为 33 W,且可证实是单模运转($M^2 < 1.1$)。

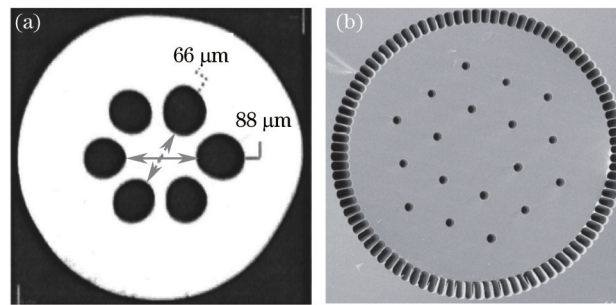


图 2 (a) 泄漏通道光纤截面图; (b) 双包层大节距光纤截面图

Fig.2 (a) Cross section view of leaky-channel fiber; (b) cross section view of large-pitch fiber

2.1.3 拉锥选模

光纤拉锥进行选模最早由英国南安普顿大学的 Alvarez-Chavez 等^[23]提出并付诸实践,激光器尾端或全反镜端引入锥形光纤,其结构如图 3(a)所示,通过控制光锥的半发散角小于纤芯的数值孔径,可对基模实现低损耗,而高阶模通过光锥时,由于芯径的巨大变化而产生高损耗,从而实现单模传输,图中 r 为拉锥束腰半径, z 为拉锥长度, θ 为光线入射角, Ω 为半锥角。实验中 Alvarez-Chavez 对芯径 15 μm 的双包层光纤进行拉锥,对应最大输出功率降为 9 W,功率损失 20%,但光束质量因子得到改善,由 2.6 降为 1.4,光束亮度提高了 3.5 倍。2002 年,Jeong 等^[24]采用双端拉锥将芯径 23.8 μm 光纤的光束质量因子由 2.93 降至 1.25,实现稳定单模运转。2008 年,Li 等^[25]将 43 μm 纤芯拉锥至 9 μm ,得到了 56.4 W 激光输出,斜率效率为 54.1%,光束质量因子减小至 1.14,光斑亮度提高了 5.28 倍。2010 年,Filippov 等^[26]对全段掺镱双包层光纤进行拉锥,并对比凹面、凸面和线性拉锥三种情况下的激光放大特性,实验装置如图 3(b)所示,结果表明采用凸面拉锥可实现 750 W 激光输出,斜率效率达到 81.9%, M^2 为 1.7,光斑亮度增强近 5 倍,图中 R 为反射率。2012 年,Kerttula 等^[27]将 18 m 掺镱光纤拉成渐变锥形结构,纤芯从 44 μm 减小至 7.5 μm ,实验中 490 mW 种子光得到了 110 W 平均输出功率,增益达到 25 dB,斜率效率为 63%且无增益饱和现象,输出光束接近衍射极限($M^2=1.06$)。2013 年,Trikshev 等^[28]利用上述锥形光纤搭建主控振荡器功率放大器(MOPA)结构,其中前置放大以 (6/125) μm 的 GTWave 光纤为增益介质,最终输出光束质量 $M^2=1.05$,激光输出功率提高到 160 W,斜率效率为 61.4%,增益约 40 dB。2014 年,Leich 等^[29]以 915 nm 半导体激光器(LD)抽运尾端拉锥成标准单模光纤的大芯径掺镱光纤,其纤芯为 126 μm ,在 976 nm 处得到 10 W 的激光输出,对应 31%的斜率效率。

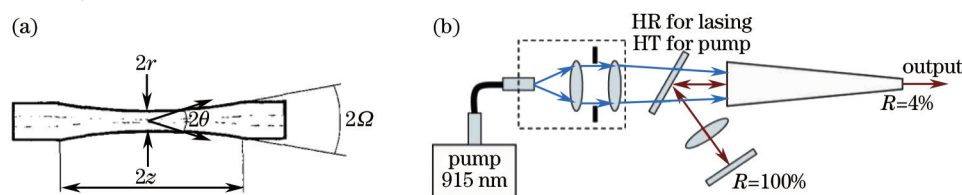


图 3 (a) 锥形光纤示意图; (b) 锥形光纤激光器实验装置

Fig.3 (a) Schematic drawing of fiber taper; (b) tapered fiber laser set-up

2.2 基于光纤结构设计

2.2.1 增益导引折射率反导引光纤

2003 年,美国斯坦福大学的 Siegman^[30]提出了一种名为增益导引折射率反导引(GG-IAG)的新型光纤,与传统的阶跃折射率光纤不同,这种光纤纤芯折射率低于包层折射率,因此传统的全内反射机制不再适用,纤芯传输的光会泄露到包层,即折射率反导引,但由于纤芯中含有增益介质,在激光抽运下,纤芯产生增益且增益上升到足够大时,形成增益导引效应,从而束缚光束在纤芯中传输。Siegman 在文中详细阐述了 GG-IAG 光纤的理论模型,为该类型激光器的发展奠定了基础。

2006 年,Siegman 等^[31]制备出第一根掺 Nd GG-IAG 光纤,如图 4(a)所示,芯径达到 100 μm ,纤芯与包层折射率差为 -0.0049,采用脉冲 Xe 灯对 10 cm GG-IAG 光纤进行侧向抽运,在 1052 nm 波长处最高得到

0.75 mJ的能量输出,光束质量因子 $M^2 \leq 2$ 。2007年,Chen等^[32]在前者基础上对芯径100、200、300、400 μm 的掺Nd GG-IAG光纤进行激光性能测试,通过不断改变输出端耦合器(OC)的反射率,测得光束质量因子 M^2 均在1.8以下,其中,200 μm 芯径情况下, M^2 减小至1.2。2008年,Sudesh等^[33]以LD对芯径为200 μm ,长为26 mm的掺Nd GG-IAG光纤进行前向抽运,获得 $M^2=1.2$ 的近高斯型的单模激光。2010年,Hageman等^[34]在200 W抽运功率下实现了18 mJ脉冲能量输出,斜率效率约为4.3%,脉冲平均功率为6 W,光束质量因子 $M^2 < 1.4$,其增益光纤与Siegman实验所用相同,并以阵列LD进行侧向抽运。同年,中国科学院西安光学精密机械研究所李玮楠等^[35]报道了120 $\mu\text{m}/220 \mu\text{m}/260 \mu\text{m}$ 结构的掺镱双包层GG-IAG光纤,其纤芯与内包层折射率差 Δn 为-0.00094,实验以1040 nm单模信号光入射光纤测试系统,测得其输出光束质量因子 M^2 约为2.9,模场直径超过150 μm 。随后该课题组又制备出芯径高达200 μm 的D形双包层掺镱光纤,在8 W抽运功率下得到22 mW激光放大输出^[36]。2012年,Wang等^[37]在300 μm 芯径下斜率效率高达26.2%,200 μm 芯径下光束质量 M^2 高达1.25。2013年,Zhu等^[38]建立了GG-IAG光纤激光器理论模型,计算结果表明采用双端抽运方式,并通过优化光纤长度和输出耦合器反射率可得到最佳激光输出特性。

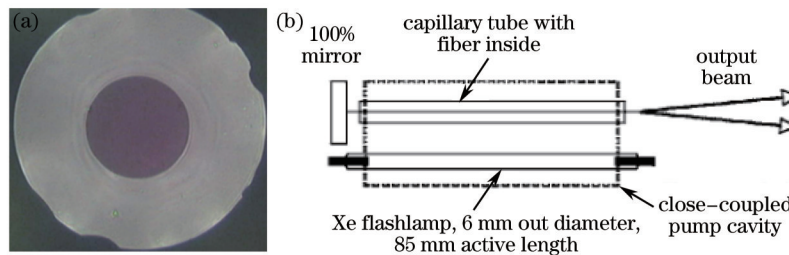


图4 (a) 增益导引折射率反导引光纤截面图; (b) 灯抽运激光器结构

Fig.4 (a) Cross section view of GG-IAG fiber; (b) flashlamp pump cavity used in experimental tests

2.2.2 光子晶体光纤

光子晶体光纤最早由英国巴斯大学的Knight^[39]制备出来,可在较宽的波长范围内实现单模传输,被认为是实现大模场面积光纤最有效的方法。2003年,Wadsworth等^[40]在传统双包层光子晶体光纤(PCF)的基础上又增加了两层空气孔,使得包层数值孔径 $NA > 0.8$,纤芯采用偏芯设计,直径达15 μm ,这种结构的光纤激光器最大输出功率为3.9 W,斜率效率为30%,单横模运转。2004年,Limpert等^[41]通过替换7根毛细管,制备出芯径为40 μm ,模场直径为35 μm ,模场面积为1000 μm^2 的PCF,经放大得到60 kW峰值功率,50 W平均功率激光输出,斜率效率为74%,光束质量因子 $M^2 < 1.2$,实现单横模运转。2006年,Brooks等^[42]利用芯径100 μm 的棒状PCF搭建MOPA结构,光纤输出光斑模场直径为85 μm ,峰值功率为4.5 MW,对应脉冲能量为4.3 mJ,平均功率为42 W,斜率效率达到60%, M^2 为1.3。同年,Limpert等^[43]报道了更高斜率效率的单横模棒状掺镱PCF,达到78%,连续激光输出最高为320 W。2011年,Alkeskjold等^[44]以带隙型PCF为基础,在包层加入环形掺镱空气孔形成分布模式滤波(DMF)机制,通过调节空气孔大小,实现了84 μm 芯径下910~1064 nm范围内的单模传输。随后,Napierała等^[45]设计出具有两种空气孔间距的PCF,大间距空气孔更有利于增加高阶模式的弯曲损耗,实验表明,该结构PCF对基模的弯曲损耗在0.01 dB/m以下,而高阶模的弯曲损耗则超过50 dB/m,光纤模场面积达到1454 μm^2 。2012年,Kashiwagi等^[46]通过在48 μm 芯径周围排布5层高折射率掺镱芯棒,在第一带隙内实现了712 μm^2 模场面积,光束质量因子 M^2 为1.05,接近衍射极限,且基模损耗小于0.1 dB/m。

2.2.3 增益控制光纤

光纤中基模与高阶模的模场分布区域有所不同,通过控制纤芯中的掺杂分布,降低高阶模的增益,从而达到抑制高阶模的目的,称为增益控制技术。2002年,Limpert等^[47]通过计算芯径为50 μm ,折射率差为0.003,纤芯数值孔径为0.093的阶跃光纤模型,得出当掺杂半径为16.9 μm 时,高阶模可得到最大程度的抑制,其损耗达0.7 dB/m。2006年,Hotoleanu等^[48]对芯径为25 μm ,数值孔径为0.06的掺杂光纤模型进行计算,结果表明在7.5 μm 的均匀掺杂半径下,基模与高阶模功率之比最大,为3.21,且输出光斑为高斯型,再次印证增益控制技术能够很好地抑制高阶模的传输。2008年,袁艳阳等^[49]提出采用复合型折射率分布光纤,并优化纤芯掺杂半径,可得到2168 μm^2 的大模场面积,基模提取率达到60%。2010年,Marciante等^[50]制备出

芯径为 $28\ \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.09 的掺镱双包层光纤, 纤芯掺杂比例分别为 100%、76%、62%, 通过对比三种光纤的输出功率及光束质量因子, 发现部分掺杂的光纤能够有效降低光纤阈值功率, 提高输出功率, 且 M^2 值不随输出功率的增加而恶化, 始终稳定在 1.3 左右。2014 年, Wang 等^[51]对几种不同掺杂结构的光纤激光器进行数值模拟, 指出部分均匀掺杂光纤可得到最高基模提取率, 超过 90%, 明显优于抛物线型掺杂效果。同时, Wang 等还指出不同掺杂形状的双包层光纤能够得到不同的高阶模式。

2.3 光纤模式转换

2.3.1 高阶模光纤

2006 年, Ramachandran^[52]转换思路, 不再采用基模传输, 而是利用模场面积更大的高阶模来有效抑制非线性效应, 同时, 在高阶模光纤两端连接特定的长周期光纤光栅, 实现基模与高阶模之间的转换, 称为高阶模光纤(HOM), 光纤端面如图 5(a)所示, 利用所制备的 $(15/86)\ \mu\text{m}$ HOM 光纤, 实现了 $2100\sim 3200\ \mu\text{m}^2$ 的大模场面积。同年该研究团队利用 5 m 长上述光纤进行脉冲放大, 获得了 61 kW 峰值功率的飞秒脉冲, 且脉冲形状没有发生畸变^[53]。除了利用 HOM 实现高功率激光传输, 2007 年, Nicholson 等^[54]搭建了如图 6 所示的 8 字形掺镱光纤激光器, 其中腔内 HOM 调制装置能够产生正色散, 起到色散补偿的作用, 尾端 HOM 调制器可进行脉冲压缩, 实验得到 95 fs 的单脉冲输出。2012 年, Nicholson 等^[55]制备出 $(148/256)\ \mu\text{m}$ 尺寸的掺镱 HOM 光纤, 基模在经过长周期光栅(LPG)转化为 $\text{LP}_{0,14}$ 模式, 对应高达 $6000\ \mu\text{m}^2$ 的模场面积, 在 1480 nm 拉曼光纤激光器抽运下, 得到了 54.5 W 的激光放大输出, 斜率效率为 66%。2013 年, 该团队又对 4.5 m 长的相同 HOM 光纤进行脉冲放大, 其输出光束质量因子 M^2 为 1.2, 为单模运转^[56]。在正弦波相位调制下, 该放大装置最高可得到 5.1 kW 峰值功率, 512 μJ 输出脉冲。HOM 光纤巧妙地将基模转换为模场面积更高的高阶模式, 能够实现高功率下的激光放大, 避免了非线性效应和光纤损伤的影响, 为大模场面积光纤设计提供了一种新的方向。

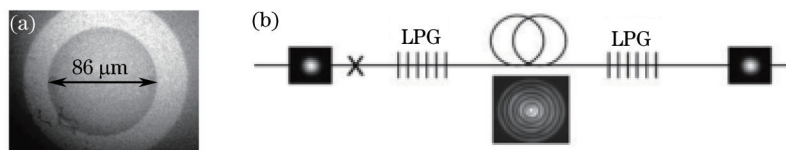


图 5 (a) 高阶模光纤端面图; (b) 高阶模光纤工作原理示意图

Fig.5 (a) Cross section view of HOM fiber; (b) device schematic of HOM fiber

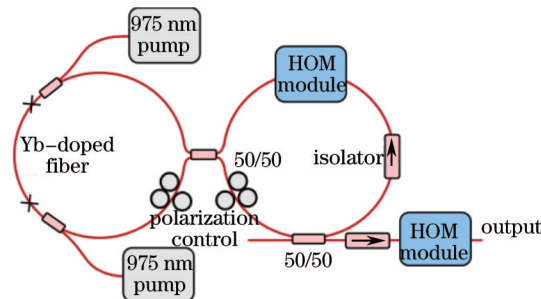


图 6 8 字形腔掺镱光纤激光器装置示意图

Fig.6 Schematic of the Yb-doped figure-eight fiber laser

2.3.2 手性耦合芯光纤

2007 年, 美国 Michigan 大学报道了一种名为手性耦合芯光纤(3C)的新型光纤结构^[57], 如图 7(a)所示。该无源光纤具有 $35\ \mu\text{m}$ 的芯径, 可在 1550 nm 处获得光束质量因子 M^2 为 1.04 的基模光斑, 对应基模损耗仅为 0.095 dB/m, 且兼具 34 dB 消光比的保偏特性。2008 年, 该实验小组利用芯径为 $33\ \mu\text{m}$ 的掺镱双包层 3C 光纤搭建激光器平台, 在 1066 nm 处得到了 37 W 激光输出, 斜率效率达 75%, 输出光斑证实为基模^[58]。随后, Huang 等^[59]又对该光纤进行脉冲激光放大测试, 实验得到 10 ns 输出脉冲, 能量达到 1.14 mJ, 输出峰值功率为 114 kW, 平均功率为 140 W, 对应 74% 的放大斜率效率。而该光纤的 MOPA 结构实验装置可将输出功率提升至 511 W, 输出单频单横模的线偏振光^[60]。2014 年, Ma 等^[61]在标准 3C 光纤的基础上, 设计出如图 7(b)所示的八边形芯八条侧芯螺旋的 3C 光纤, 其芯径扩展至 $55\ \mu\text{m}$, 经实验测试, 该光纤具有 57.1% 激光斜率效率, 光束质量因子 M^2 为 1.12, 近似单模运转。

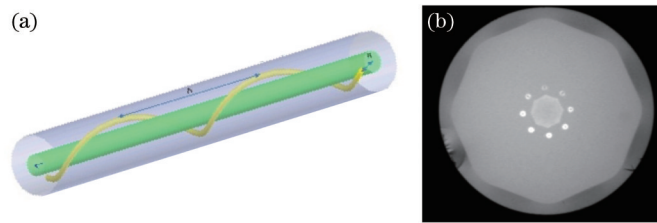


图7 (a) 手性耦合芯光纤三维结构示意图; (b) 改进的3C光纤端面图

Fig.7 (a) 3D geometry of 3C structure; (b) cross section view of modified 3C fiber

3 结 论

对比以上几种大模场面积光纤,可以看出,弯曲选模法是目前最简单的方法,但仅适用于纤芯直径不太大的情况,当芯径较大或NA较低时,基模与高阶模之间的弯曲损耗差异逐渐减小,且激光模场发生畸变,因此高阶模抑制效果受到限制。而光纤拉锥的方法由于纤芯变细易产生功率损伤,难以进一步提升光纤芯径。棒状光子晶体光纤虽然可以实现百微米直径纤芯,但对弯曲极其敏感,不利于激光器的集成化发展。GG-IAG光纤和掺杂控制技术理论上可极大提升纤芯直径,但目前为止还未有实验证明其高功率单模运转的优势,且光纤制备较复杂,对工艺要求较高。其他方式如3C光纤、LCF、LPF及HOM光纤同样需要复杂的光纤制备过程,但表现出良好的模式控制效果和激光性能提升,是目前提升光纤激光器输出功率最具前景的方法之一。此外,通过深入研究大模场面积光纤中模式的增益与损耗机制,将各方法的优势有效结合起来,同时提升光纤制备工艺水平,相信能有更好的实验效果,为高功率激光器的发展提供新的有效途径。

高功率高光束质量光纤激光器在工业加工、医疗国防等领域具有极高的应用价值,且大模场面积光纤相关研究也取得了巨大成就。但目前多数大模场面积光纤仅停留在理论分析和实验操作阶段,还未能与光纤激光器的应用很好地结合起来,因此需要克服诸多技术难点,逐步实现高功率高光束质量光纤激光器的产业化发展。

参 考 文 献

- 1 Limpert J, Schreiber T, Clausnitzer T, *et al.*. High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2002, 10(14): 628-638.
- 2 Hideur A, Chartier T, Özkul C, *et al.*. All-fiber tunable ytterbium-doped double-clad fiber ring laser[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(14): 1054-1056.
- 3 Okhotnikov O G, Gomes L, Xiang N, *et al.*. Mode-locked ytterbium fiber laser tunable in the 980-1070 nm spectral range[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(17): 1522-1524.
- 4 Selvas R, Sahu J K, Fu L B, *et al.*. High-power, low-noise, Yb-doped, cladding-pumped, three-level fiber sources at 980 nm[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(13): 1093-1095.
- 5 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. 1.5 kW near single-mode all-fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0702001. 代守军, 何兵, 周军, 等. 1.5 kW近单模全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0702001.
- 6 Xu Guojian, Li Hongli, Hang Zhengxiang, *et al.*. Performance of 6 mm mild steel sheet laser cutting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 040601. 徐国建, 李宏利, 杭争翔, 等. 6 mm碳钢板的激光切割性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 040601.
- 7 Limpert J, Roser F, Klingebiel S, *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13(3): 537-545.
- 8 Sakai J, Kimura T. Bending loss of propagation modes in arbitrary-index profile optical fibers[J]. *Appl Opt*, 1978, 17(10): 1499-1506.
- 9 Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers[J]. *J Opt Soc Am*, 1976, 66(3): 216-220.
- 10 Koplów J P, Kliner D A V, Goldberg L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(7): 442-444.
- 11 Carter A, Samson B. New technology advances applications for high-power fiber lasers[J]. *Military & Aerospace Electronics*, 2005, 16(7): 16-21.
- 12 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. Transverse-mode controlling of a large-mode-area multimode fiber laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2007, 5(9): 524-526.

- 13 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. Influence of bending diameter on output capability of multimode fiber laser[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2008, 1(1-2): 91-94.
- 14 Wang P, Cooper L J, Clarkson W A, *et al.*. Helical-core Yb-doped fibre laser[C]. *Lasers and Electro-Optics Europe, CLEO Conference on. IEEE*, 2003. 612.
- 15 P Wang. Efficient single-mode operation of a cladding-pumped ytterbium-doped helical-core fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(2): 226-228.
- 16 Zhao Chujun, Fan Dianyuan, Peng Runwu, *et al.*. Core size scaling of helical-core optical fibres[J]. *Chin Phys Lett*, 2006, 23(10): 2793-2795.
- 17 Wong W S, Peng X, McLaughlin J M, *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.
- 18 Dong Liang, Li Jun, Peng Xiang. Bend-resistant fundamental mode operation in ytterbium-doped leakage channel fibers with effective areas up to $3160 \mu\text{m}^2$ [J]. *Opt Express*, 2006, 14(24): 11512-11519.
- 19 Dong L, Wu T, McKay H A, *et al.*. All-glass large-core leakage channel fibers[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(1): 47-53.
- 20 Stutzki F, Jansen F, Eidam T, *et al.*. High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(5): 689-691.
- 21 Limpert J, Stutzki F, Jansen F, *et al.*. Yb-doped large-pitch fibres: Effective single-mode operation based on higher-order mode delocalisation[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(4): e8.
- 22 Stutzki F, Jansen F, Jauregui C, *et al.*. 2.4 mJ, 33 W Q-switched Tm-doped fiber laser with near diffraction-limited beam quality[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(2): 97-99.
- 23 Alvarez-Chavez J A, Grudinin A B, Nilsson J, *et al.*. Mode selection in high power cladding pumped fibre lasers with tapered section[C]. *Lasers and Electro-Optics, CLEO. Summaries of Papers Presented at the Conference on. IEEE*, 1999. 247-248.
- 24 Jeong H, Choi S, Oh K. Continuous wave single transverse mode laser oscillation in a Nd-doped large core double clad fiber cavity with concatenated adiabatic tapers[J]. *Opt Commun*, 2002, 213(1-3): 33-37.
- 25 Li L, Lou Q, Zhou J, *et al.*. High power single transverse mode operation of a tapered large-mode-area fiber laser[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(4): 655-657.
- 26 Filippov V, Kerttula J, Chamorovskii Y, *et al.*. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser[J]. *Opt Express*, 2010, 18(12): 12499-12512.
- 27 Kerttula J, Filippov V, Chamorovskii Y, *et al.*. Tapered fiber amplifier with high gain and output power[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(11): 1734-1738.
- 28 Trikshev A I, Kurkov A S, Tsvetkov V B, *et al.*. A 160 W single-frequency laser based on an active tapered double-clad fiber amplifier[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(6): 065101.
- 29 Leich M, Jaeger M L, Grimm S, *et al.*. Tapered single-mode Yb-fiber laser at 976 nm[C]. *Specialty Optical Fibers, 2014. SoM3B*. 6.
- 30 Siegman A E. Propagating modes in gain-guided optical fibers[J]. *J Opt Soc Am*, 2003, 20(8): 1617-1628.
- 31 Siegman A E, Chen Y, Sudesh V, *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.
- 32 Chen Y, McComb T, Sudesh V, *et al.*. Very large-core, single-mode, gain-guided, index-antiguided fiber lasers[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(17): 2505-2507.
- 33 Sudesh V, McComb T, Chen Y, *et al.*. Diode-pumped 200 μm diameter core, gain-guided, index-antiguided single mode fiber laser[J]. *Appl Phys B*, 2008, 90(3-4): 369-372.
- 34 Hageman W, Chen Y, Wang X, *et al.*. Scalable side-pumped, gain-guided index-antiguided fiber laser[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(12): 2451-2459.
- 35 Li Weinan, Lu Min, Peng Bo. Study on the characteristic of Yb^{3+} -gain guided index-antiguided fiber[C]. *The Chinese Optical Society 2010 Optical Conference Proceedings*, 2010. 1868-1872.
李玮楠, 陆敏, 彭波. 掺 Yb^{3+} 增益导引-折射率反导引光纤特性研究[C]. *中国光学学会 2010 年光学大会论文集*, 2010. 1868-1872.
- 36 Li W, Lu M, Yang Z, *et al.*. Fabrication and characterization of Yb^{3+} -doped gain-guided index-antiguided fiber with D-shaped inner cladding[J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(6): 1498-1501.
- 37 Wang X, Chen Y, Hageman W, *et al.*. Transverse mode competition in gain-guided index antiguided fiber lasers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2012, 29(2): 191-196.
- 38 Zhu Y, Duan K, Zhao B, *et al.*. Output performance of gain guided and index antiguided fiber lasers pumped by

- different methods[C]. Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2013. 486–490.
- 39 Knight J C, Birks T A, Russell P S J, *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(19): 1547–1549.
- 40 Wadsworth W, Percival R M, Bouwmans G, *et al.*. High power air-clad photonic crystal fiber laser[J]. *Opt Express*, 2003, 11(1): 48–53.
- 41 Limpert J, Liem A, Reich M, *et al.*. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2004, 12(7): 1313–1319.
- 42 Brooks C D, Di Teodoro F. Multimegawatt peak-power, single-transverse-mode operation of a 100 μm core diameter, Yb-doped rodlike photonic crystal fiber amplifier[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(11): 11119–11122.
- 43 Limpert J, Schmidt O, Rothhardt J, *et al.*. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. *Opt Express*, 2006, 14(7): 2715–2720.
- 44 Alkeskjold T T, Laurila M, Scolari L, *et al.*. Single-mode ytterbium-doped large-mode-area photonic bandgap rod fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2011, 19(8): 7398–7409.
- 45 Napierala M, Nasilowski T, Beres-Pawlik E, *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber with double lattice constant structure and low bending loss[J]. *Opt Express*, 2011, 19(23): 22628–22636.
- 46 Kashiwagi M, Saitoh K, Takenaga K, *et al.*. Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high-power all-fiber lasers[J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 15061–15070.
- 47 Limpert J, Zellmer H, Tünnermann A, *et al.*. Suppression of higher order modes in a multimode fiber amplifier using efficient gain-loss-management (GLM)[J]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2002. 68.
- 48 Hotoleanu M, Söderlund M, Kliner D, *et al.*. High-order modes suppression in large mode area active fibers by controlling the radial distribution of the rare earth dopant[C]. *Lasers and Applications in Science and Engineering*, International Society for Optics and Photonics, 2006. 61021T.
- 49 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.
- 50 Marciante J R, Roides R G, Shkunov V V, *et al.*. Near-diffraction-limited operation of step-index large-mode-area fiber lasers via gain filtering[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(11): 1828–1830.
- 51 Wang Wenliang, Huang Liangjin, Leng Jinyong, *et al.*. Specific mode output from multimode fiber oscillators by designing the rare earth doping profiles[J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(9): 094207.
- 52 Ramachandran S, Nicholson J W, Ghalmi S, *et al.*. Light propagation with ultralarge modal areas in optical fibers[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(12): 1797–1799.
- 53 Nicholson J W, Ramachandran S, Ghalmi S, *et al.*. Propagation of femtosecond pulses in large-mode-area, higher-order-mode fiber[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(21): 3191–3193.
- 54 Nicholson J W, Ramachandran S, Ghalmi S. A passively-modelocked, Yb-doped, figure-eight, fiber laser utilizing anomalous-dispersion higher-order-mode fiber[J]. *Opt Express*, 2007, 15(11): 6623–6628.
- 55 Nicholson J W, Fini J M, DeSantolo A M, *et al.*. Scaling the effective area of higher-order-mode erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2012, 20(22): 24575–24584.
- 56 Nicholson J W, Fini J M, Liu X, *et al.*. Single-frequency pulse amplification in a higher-order mode fiber amplifier with fundamental-mode output[C]. *CLEO: Science and Innovations*, 2013. CW3M. 3.
- 57 Liu C H, Chang G, Litchinister N, *et al.*. Chirally coupled core fibers at 1550-nm and 1064-nm for effectively single-mode core size scaling[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2007. CTuBB3.
- 58 Swan M C, Liu C H, Guertin D, *et al.*. 33 μm core effectively single-mode chirally-coupled-core fiber laser at 1064-nm [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2008. OWU2.
- 59 Huang S, Zhu C, Liu C H, *et al.*. Power scaling of CCC fiber based lasers[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2009. CThGG
- 60 Zhu C, Hu I, Ma X, *et al.*. Single-frequency and single-transverse mode Yb-doped CCC fiber MOPA with robust polarization SBS-free 511 W output[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2011. AMC
- 61 Ma X, Zhu C, Hu I, *et al.*. Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than 50 μm diameter cores[J]. *Opt Express*, 2014, 22(8): 9206–9219.

栏目编辑: 王晓琰