

手性耦合纤芯光纤简介及研究进展

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 手性耦合纤芯(CCC)光纤作为一种新型光纤,具有单模传输稳定、熔接损耗低和便于紧凑盘绕等优点,为下一代高峰值功率和高能量的光纤激光器系统的发展提供了新的途径,逐渐引起国内外研究人员的关注。介绍了CCC光纤的结构、国内外最新研究进展和应用前景,同时简单阐述了该新型光纤的模式耦合相关原理。

关键词 光纤光学;手性耦合纤芯光纤;单模传输;模式耦合;光纤激光器

中图分类号 TN244 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.040003

Introduction and Progress of Chirally-Coupled Core Fiber

Zhao Nan Li Jinyan

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

Abstract Due to the robust single-mode performance, mode-distortion-free splicing and compact coiling, chirally-coupled core (CCC) fiber, as a novel fiber, has provided a new method for the development of the next generation high peak power and high energy fiber laser system and aroused wide public interest over the recent years. In this paper, we describe the chirally-coupled core fiber structure and mode coupling theory in this fiber. Recent development and some important applications about the novel fiber are also reviewed.

Key words fiber optics; chirally-coupled core fiber; single mode transmission; mode coupling; fiber laser

OCIS codes 060.2430; 060.3510; 140.3570; 140.3510

1 引言

近年来,光纤激光器及其相关技术发展迅猛,输出功率得到极大的提高,可以达到千瓦量级以上平均功率^[1]和兆瓦量级的峰值功率^[2],因此受到人们的广泛关注。然而,随着功率的提高,光纤中的光功率密度增大,受激拉曼散射(SRS)等非线性效应变得比较严重,这限制了光纤激光器输出功率的进一步提升。

为解决该问题,通常采用大模场面积(LMA)光纤或光子晶体光纤(PCF)来实现激光器的高功率输出。然而,前者会导致高阶模传输,只有采用正确的激励或弯曲盘绕等模式控制方法^[3-4]才能实现单模传输,且对于纤芯直径超过25 μm 的LMA光纤来说,模式控制的方法很不稳定;后者虽然能实现单模输出,但在弯曲时会引起极大的模式损耗,不利于系统的集成化。

针对上述问题,2007年,美国Michigan大学超快光学研究中心提出了一种名为手性耦合纤芯(CCC)光纤^[5]的新型光纤结构,它能够突破传统单模光纤 $V=2.405$ 归一化截止频率的限制,在大纤芯尺寸(大于30 μm)的情况下实现稳定的单模输出,且无需任何模式控制技术。这样既可达到提升光纤激光器输出功率的目的,又可以很方便地将光纤置于复杂系统中,实现光纤激光系统的集成化。此外,CCC光纤还具有模式无失真熔接和紧凑盘绕(盘绕半径小于15 cm)的优点^[6],与采用标准光纤熔接与处理技术制备出的光学元件相匹配。CCC光纤为实现高峰值功率与高能量的光纤激光器系统提供了一种新的途径,逐渐成为国内外研究人

收稿日期: 2013-10-12; 收到修改稿日期: 2013-12-05; 网络出版日期: 2014-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(81100701)

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、光子晶体光纤等方面的研究。E-mail: ljy@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

员关注的热点。

本文综述了CCC光纤的发展现状,同时介绍了该光纤的基本结构与相关参数,从三方面阐述了CCC结构的特殊功能,并从准相位匹配(QPM)条件出发讨论光纤中高阶模式之间的耦合。

2 CCC光纤简介

2.1 CCC光纤的结构和参数

普通光纤通常由包层和沿轴向分布的纤芯构成,而CCC光纤的结构非常特殊,它的石英包层内有两条纤芯,如图1所示^[6]。其中一条是沿轴向分布的中央纤芯,芯径较大,一般在30 μm以上,用于信号光的传输;另一条则是偏离中心轴、围绕中央纤芯螺旋分布的侧芯,它的芯区直径比中央纤芯小得多,只有十几微米,主要作用是控制中央纤芯的模式,将高阶模耦合进侧芯并对其产生高损耗(大于100 dB/m),使得中央纤芯中的基模可以近乎无损耗(小于0.1 dB/m)地传输。这样,CCC光纤不依靠任何模式控制技术便可在实现大模场面积的同时保持单模传输,很好地解决了上述难题。

从图1可以看出,CCC光纤的主要参数包括两芯尺寸 d_{central} 和 d_{side} 、侧芯偏移量 R 和螺旋周期 Λ 。其中, R 和 Λ 的选择尤为重要,只有合理的 R 和 Λ 值才能使侧芯对中央纤芯的模式进行控制与选择。

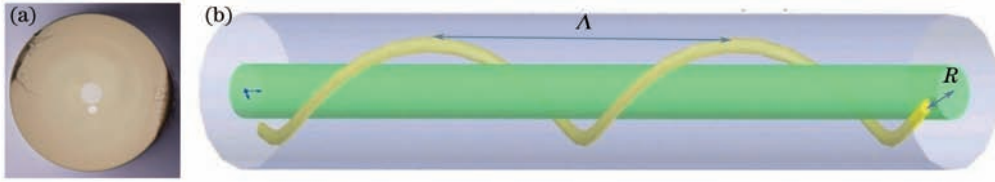


图1 (a) 光纤端面图; (b) 光纤结构三维示意图

Fig.1 (a) Cross-section view of CCC fiber; (b) three-dimensional geometry of CCC structure

2.2 CCC光纤的工作原理

CCC光纤之所以能够在在大芯径情况下实现稳定的单模传输,是因为其侧芯特殊的螺旋结构。这种新型光纤中侧芯围绕中央纤芯螺旋的复合结构可以实现以下三方面功能。

1) 实现中央纤芯基模和侧芯中模式的相速度匹配,使两模式能够进行耦合。通常两个波导之间的模式耦合要满足精确的相速度匹配条件($\beta^{(1)} = \beta^{(2)}$)^[7],但在CCC结构中,由于螺旋因素的存在,两芯中模式的传输常数不再相等,会导致额外的相位差,因此其匹配条件变为^[8]

$$\beta^{\text{side mode}} + \Delta\beta_{\text{helix}} = \beta^{\text{(central mode)}}, \quad (1)$$

式中 $\beta^{\text{(central mode)}}$ 和 $\beta^{\text{side mode}}$ 分别为中央纤芯和侧芯中模式的传播常数, $\Delta\beta_{\text{helix}} = 2\pi n/\lambda \left[\sqrt{(2\pi R/\Lambda)^2 + 1} - 1 \right]$ 为侧芯因螺旋产生的额外相速度,可通过 R 和 Λ 来控制,从而达到匹配条件。

2) 通过满足准相位匹配条件,可提供中央纤芯和侧芯之间有效的高阶模式的对称选择性耦合。该QPM条件为^[9]

$$\beta_{l_1 m_1} - \beta_{l_2 m_2} \sqrt{1 + K^2 R^2} - \Delta m K = 0, \quad (2)$$

式中 $\beta_{l_1 m_1}$ 为主芯中 $LP_{l_1 m_1}$ 模的传播常数, $\beta_{l_2 m_2}$ 为侧芯中 $LP_{l_2 m_2}$ 模的传播常数; $\sqrt{1 + K^2 R^2}$ 为侧芯的螺旋修正因子,由于QPM条件要求侧芯传输常数为投射到中心轴的值,因此对 $\beta_{l_2 m_2}$ 作出修正; $K = 2\pi/\Lambda$,表示侧芯螺旋率; $\Delta m = \Delta l + \Delta s$,其中 Δl 由四种可能的组合构成 $\Delta l = \pm l_1 \pm l_2$,而 Δs 的可能取值为 $-2, -1, 0, +1, +2$ 。该公式表明,两模式之间由于螺旋因素所产生的相位差被螺旋率 K 所弥补时,便可相互作用。只有满足该QPM条件的两芯中的模式才能发生耦合,使中央纤芯的高阶模耦合进侧芯。

3) 合理选择侧芯尺寸、偏移量 R 及螺旋周期 Λ ,实现侧芯中高阶模式的高损耗特性。

通过满足QPM条件和侧芯高损耗特性,可以将中央纤芯的高阶模式耦合到侧芯从而被损耗掉,只留下基模稳定传输。而利用特性1),使中央纤芯基模与侧芯模式发生部分耦合,可方便地控制基模的相速度与色散特性。

3 CCC光纤的研究现状及应用前景

3.1 CCC光纤的研究现状

美国 Michigan 大学超快光学研究中心最早展开对 CCC 光纤的研究,并取得了巨大成就。

2007年,该机构的 Liu 等^[7-8]提出了 CCC 光纤的理念,为了验证 CCC 光纤的单模传输特性,他们以芯径 30 μm 的单模光纤(SMF)和中央纤芯芯径 34 μm 的 CCC 光纤做对比模拟,均用只有 12.5%的光功率与基模匹配的光源进行激励,经过 20cm 左右距离的传播,两根光纤都只剩下 12.5%的功率,说明纤芯中只剩下基模传输,其余模式均损耗掉^[9]。这一结果从理论上证实了 CCC 光纤等效于标准单模光纤,具有单模传输特性。

为了进一步验证模拟结果,Liu 等^[7]根据相关参数制备出中央纤芯芯径 35 μm 、侧芯芯径 12 μm 的 CCC 光纤,这也是第一根无源 CCC 光纤,同时参照模拟方法对其进行测试,得到该光纤在 1550 nm 处输出光斑为基模,光斑光束质量因子 $M^2=1.03$,且该光纤的基模损耗为 0.095 dB/m,近乎无损耗地在纤芯中传输。这是世界上首次证明 CCC 光纤具有稳定单模传输特性的实验,具有重大意义。此外,实验还发现该光纤具有很好的保偏特性,消光比达到了 34 dB。

上述结果仅仅是对 CCC 光纤相关特性的验证,还未将光纤用于激光性能测试中。2008年,该实验室制备出掺镱双包层 CCC 光纤,其中,中央纤芯直径为 33 μm ,数值孔径(NA)为 0.06;侧芯直径为 16 μm ,NA 为 0.1;侧芯螺旋周期 Λ 为 7.4 mm,两芯边到边距离为 4 μm ^[5]。利用该有源光纤搭建激光器系统,得到了很好的实验结果。实验装置采用法布里-珀罗(F-P)谐振腔,尾端的高反镜对反射光没有任何模式选择功能,光纤宽松盘绕,不会起到模式选择作用。用 915 nm 激光二极管(LD)抽运有源光纤,在 1066 nm 处得到了 37 W 激光输出,斜率效率达 75%,激光阈值功率为 6 W,输出光斑证实为基模^[5]。该实验进一步验证了 CCC 光纤的优越性,说明该光纤可以像普通光纤一样作为激光器的增益介质使用,所构成的光纤激光器具有高斜率效率和低阈值功率的优点,且输出的光束质量相比 LMA 光纤得到了极大的改善。

除了对 CCC 光纤的激光特性进行测试,Michigan 大学还在 2009 年以双包层掺镱 CCC 光纤搭建放大系统来探究其放大特性^[10]。该实验得到了 140 W 的平均输出功率,输出脉冲 10 ns,脉冲能量达到 1.14 mJ,峰值功率为 114 kW,放大斜率效率达到 74%。同样,在所有功率水平下,系统输出光斑均为单模。

2010年,该团队将 CCC 光纤应用于主振荡功率放大(MOPA)结构中来提升系统输出功率^[11]。实验以 2.7 m 长空气包层掺镱 CCC 光纤为功率放大器的增益介质,用 2.2 W 信号光激励该光纤,实现了 511 W 的 MOPA 结构功率输出,放大器斜率效率为 70%,同时观测到输出光束为单频单横模的线偏振光,具有大于 15 dB 的消光比。

2013年,立陶宛物理科学与技术中心的 Želudevičius^[12]通过搭建飞秒光纤啁啾脉冲放大(CPA)系统来提升输出功率,该系统中的功率放大装置采用 CCC 光纤为增益介质。实验得到了 50 μJ 的脉冲能量,400 fs 的脉冲,输出光斑为近似衍射极限,光束质量因子为 1.1。

以上一系列实验除了证实 CCC 光纤的稳定单模传输特性,还说明了该光纤的高输出功率、高斜率效率和良好偏振特性等优势,非常适合未来高功率光纤激光器的发展,有利于激光器系统的集成化。

2011年,Ma 等^[9]利用 Maxwell 方程组和有限元法,从光学角动量入手并建立新的参考系,对 CCC 光纤中的模式作用进行了完整的理论分析,得出该光纤的模式匹配条件,这也是首次公开发表的 CCC 光纤的理论基础。

3.2 CCC光纤的应用前景

CCC 光纤除了能够实现稳定的单模传输外,根据其特殊结构,我们预测该光纤还能够抑制某些非线性效应。例如,利用中央纤芯基模与侧芯模式选择性耦合的特点,使基模某一偏振态耦合进侧芯,这样经反射回来的偏振态便与原偏振态相反,从而有效抑制受激布里渊散射(SBS);经过特殊结构设计的 CCC 光纤,其透射谱具有一定范围的波长抑制区域,将该抑制区与斯托克斯 SRS 增益谱的峰值区相重合,便能有效抑制 SRS 效应;同时改变波长抑制区的范围,还能实现对掺镱光纤激光器和放大器的波长选择。CCC 光纤理论分析还表明其输出光束携带有角动量,因此可以预见 CCC 光纤能够实现颗粒俘获与操纵、量子通信、量子计算和多维量子空间中的信息编码等新型应用^[9]。

在 CCC 光纤的研究阶段,也遇到了一些问题。理论上 CCC 光纤的中央纤芯直径可以做到很大,但由于 CCC 结构中模式的相互作用不仅发生在模式对之间,还会引发模群作用,这会影响中央纤芯功率向侧芯转移的效率,从而减弱了对中央纤芯高阶模式的抑制作用。鉴于该光纤模式相互作用的复杂性,暂时无法对纤芯最大尺寸作出精确表述,不过目前 CCC 光纤的纤芯直径已经可以做到 50 μm 。

4 结束语

CCC 光纤既解决了 LMA 光纤多模传输的问题,也克服了弱导光纤弯曲损耗极大的缺点,无需任何模式控制技术便可实现稳定的单模传输。一系列相关实验还证实 CCC 光纤具有高输出功率、高斜率效率和良好保偏特性等优势,为高功率光纤激光器的功率提升提供了一条有效途径,有利于激光器系统的集成化发展。此外,CCC 光纤结构还可以控制非线性效应、实现量子通信等特殊功能。CCC 结构能够实现的其他新型功能还有待我们的进一步研究,可以肯定的是,CCC 光纤无论在科学研究还是实际应用领域,都具有非常重要的意义及广阔的发展前景。

参考文献

- 1 Gapontsev V, Gapontsev D, Platonov N, *et al.*. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness [C]. CLEO/Europe 2005, 2005: 508.
- 2 Hou K C, Cheng M Y, Galvanauskas A, *et al.*. Multi-MW peak power scaling of single-transverse mode pulses using 80 μm core Yb-doped LMA fibers[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2006. MF5.
- 3 Fermann M E. Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses[J]. Opt Lett, 1998, 23(1): 52-54.
- 4 Koplrow 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.
- 5 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]. OFC, 2008. OWU2.
- 6 Galvanauskas A, Swan M C, Liu C H. Effectively-single-mode large core passive and active fibers with chirally-coupled-core structures[C]. CLEO/QELS 2008, 2008.
- 7 Liu C H, Chang G, Litchinitser N, *et al.*. Effectively single-mode chirally-coupled core fiber[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2007. ME2.
- 8 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]. CLEO 2007, 2007. CTuBB3.
- 9 Ma X, Liu C H, Chang G, *et al.*. Angular-momentum coupled optical waves in chirally-coupled-core fibers[J]. Opt Express, 2011, 19(27): 26515-26528.
- 10 Huang S, Zhu C, Liu C H, *et al.*. Power scaling of CCC fiber based lasers[C]. CLEO 2009, 2009. CThGG1.
- 11 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. AMC5.
- 12 Želudevičius J, Danilevicius R, Viskontas K, *et al.*. Femtosecond fiber CPA system based on picosecond master oscillator and power amplifier with CCC fiber[J]. Opt Express, 2013, 21(5): 5338-5345.