

长拉锥双包层光纤在光纤激光领域的应用研究进展

史 尘 王小林* 粟荣涛 周 朴 许晓军 陆启生

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 锥形光纤是指在普通的柱形光纤上采用熔融拉锥、机械抛磨、化学腐蚀等手段形成的纤芯半径随长度变化的一种光纤,纤芯半径变化的部分被称为锥区。一段双包层光纤整段都为锥区时被称之为长拉锥双包层光纤(T-DCF,简称锥形光纤)。总结了锥形光纤的发展,简述了锥形光纤在光纤激光领域的应用优势以及基本理论,并对长拉锥双包层光纤在光纤激光应用的发展趋势做了探讨。

关键词 激光光学; 双包层光纤; 拉锥光纤; 非线性效应; 低亮度抽运

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.120001

Progress of Study on Long Tapered Double-Clad Fiber in Fiber Laser Application

Shi Chen Wang Xiaolin Su Rongtao Zhou Pu Xu Xiaojun Lu Qisheng

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Tapered fiber is fabricated from traditional uniformed fiber using fused conical tapering, mechanical affection, chemical corrosion and so on, whose radius is various with the length of fiber. The changing part of fiber core is called tapered area. When the tapered area is distributed in whole double-clad fiber, the fiber is called a tapered double-clad fiber (T-DCF). The developing progress of tapered fiber is summarized, the advantages and basic theories of application of T-DCF in fiber laser area are described, some major experimental results of T-DCF are discussed, and the developing trend of T-DCF in fiber laser application is listed.

Key words laser optics; double-clad fiber; tapered fiber; nonlinear effects; low brightness pump

OCIS codes 140.3510; 060.2320; 060.4370

1 引言

由于光纤特殊的波导结构,光纤激光器以其高稳定性、高光束质量、高效率、波长扩展性好等特点,在工业加工、激光通信、先进制造、国防工业等领域的应用中获得了广泛的应用前景^[1-3]。近年来,随着高亮度发光二极管(LD)光源和包层抽运技术以及双包层大模场光纤制造技术的快速发展,光纤激光技术迅猛发展,单纤单模输出功率已经达到20 kW量级^[4-6]。然而,由于所有的激光能量都被约束在微米量级的纤芯中,随着纤芯中激光功率的提升,纤芯会拥有极高的能量密度,这将激发光纤中的非线性效应,如:受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)、自相位调制(SPM)等^[7]。增加光纤的尺寸以及减小光纤的长度是抑制非线性效应的有效手段^[8],但是光纤尺寸的增加会产生另一种名为模式不稳定的非线性效应^[9]。另外,抽运亮度和抽运功率提升之间存在的矛盾已经越来越显著,对高亮度光源的功率提升变得越来越困难。在光纤激光器和放大器中,掺杂光纤作为光纤激光的增益介质,对于激光器和放大器的性能有着重要的影响,也是限制功率提升的重要因素。

区别于普通光纤(SMF),锥形光纤采用熔融拉锥、机械抛磨等手段使得光纤半径在轴向上发生变化,形成

收稿日期: 2015-06-25; 收到修改稿日期: 2015-07-17; 网络出版日期: 2015-09-24

作者简介: 史 尘(1989—),男,博士研究生,主要从事光纤激光方面的研究。E-mail: bigbryant@nudt.edu.cn

导师简介: 陆启生(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

*通信联系人。E-mail: chinawxllin@163.com

锥区以实现诸如光耦合、光传感^[10-14]、非线性光学、微纳光学、光纤传感、光纤器件^[15-17]以及其他^[18-19]研究领域的应用。目前,长锥形光纤在高功率光纤激光中的优势主要在于非线性效应的抑制以及低亮度抽运源的运用,主要的研究单位有丹麦科技大学(DTU)^[20]、俄罗斯科学院(The Russian Academy of Science)与坦佩雷理工大学(Tampere University of Technology)^[21-26]。本文主要对长拉锥双包层光纤(T-DCF)在高功率光纤激光中的应用现状进行了梳理,并且总结了相关的理论工作和实验研究。

2 长拉锥光纤的背景和制作方法

自从1970年第1根低损耗光纤被拉制成功,掀起了人们对于光纤技术的发展热潮,使光纤技术取得了长足的发展。锥形光纤是指其直径随光纤长度变化的光纤,作为一种新型光纤,它有着一般柱形光纤无法实现的特殊应用性能。目前制作长拉锥光纤的主要方法有:化学腐蚀法、机械抛磨法和熔融拉锥法。其中目前熔融拉锥法是为常用的方法,如图1所示^[27],图中CMOS是指互补金属氧化物半导体。

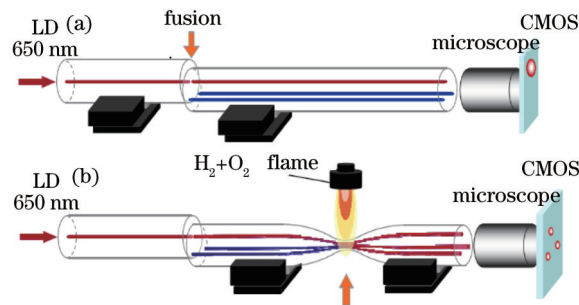


图1 (a) 光纤熔接示意图; (b) 光纤拉锥示意图

Fig.1 (a) Schematic of fiber fusion splicing; (b) schematic of fiber tapering

常规的光纤拉锥采用火焰加热, Bures 和 Burns 分别于1983和1985年提出和修正了模型^[28-29],证明了在火焰不动的情况下所拉制出的锥区绝大多数符合抛物线型。为了得到更加复杂的拉锥光纤结构,人们开始设想在光纤拉锥的过程中通过移动火焰的方式来实现不同形状的拉锥模型。1991年, Kenny等^[30]首先提出使用火焰复扫的方法来实现任意形状的拉锥光纤。2010年, Pricking等^[31]对复杂形状的拉锥进行了更加精确和详细的研究,文章中考虑了加热火焰的移动以及火焰温度的分布对拉锥直径的影响,并在实验中验证了模型的正确性,精确地得到了形状十分复杂的拉锥光纤。然而火焰加热有污染光纤、拉制效果较差、对于光纤进一步拉细与均匀控制困难的问题^[32]。在后来提出的改进方案有浙江工业大学童利民课题组提出的两步拉锥法^[33]、上海交通大学陈险峰课题组提出的新型条形电加热器法^[34]。随着激光技术的成熟,采用激光作为热源使拉制锥形光纤的方法应运而生,激光光束清洁、可控、作用快、没有惯性约束,克服了火焰及其他热源加热拉制光纤的不足,但是制作均匀较长的拉锥光纤仍然存在困难。中北大学王高课题组提出环形热源熔融拉锥法^[35],克服了加热不均匀的问题。至此,光纤拉锥的工艺逐渐走向成熟。

3 长拉锥双包层光纤的理论模型

目前对于研究长拉锥双包层光纤的理论模型主要分为相干模型^[36-37]和非相干模型^[25-38]两类。与传统柱形光纤类似,锥形双包层光纤的非相干模型也采用了速率方程模型^[39-42],非相干模型以光纤中的功率为主要变量,可以方便地考察信号光与抽运光沿光纤的变化情况,形式简单运算速度快,但是由于不包含相位信息,与相位相关的非线性效应难以被考察,也难以估计光纤中的模式和输出的光束质量。相干模型从麦克斯韦方程组出发,在功率传输过程中包含了光场的振幅、相位等信息,可以计算模式与光束质量,相比非相干模型更加准确,但是缺点就是模型的形式较为复杂,变量多,运算速度较慢。

目前的文献中的理论研究主要集中在2个方面:速率方程模型和光纤追迹模型。其中速率方程模型主要用来模拟光纤中的光功率变化,光纤追迹模型主要用来考察抽运光的耦合效率和泄露问题。

3.1 速率方程模型^[37]

在典型的光纤激光系统中,抽运光从内包层注入到掺杂光纤中。而光纤中信号光和抽运光的变化主要由以下2个方程决定:

$$\begin{cases} \pm \frac{dP_s^\pm}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2 - \sigma_{as}N]P_s^\pm - \alpha_s P_s^\pm \\ \pm \frac{dP_p^\pm}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{cp})N_2]P_p^\pm - \alpha_p P_p^\pm \end{cases}, \quad (1)$$

其中 P_s^+ 和 P_p^+ 分别是信号光和抽运光功率, +和-分别代表正向和反向传输。 N 代表光纤的掺杂粒子数, N_2 代表上能级粒子数, σ_a 和 σ_e 分别代表 Yb^{3+} 离子的吸收和发射截面, α_s 和 α_p 分别是光纤对信号光和抽运光的损耗。 Γ_p 和 Γ_s 分别是抽运光和信号光的重叠因子。抽运光的重叠因子由光纤的纤芯内包层比例决定,即

$$\Gamma_p = \frac{S_{\text{core}}}{S_{\text{clad}}}, \quad (2)$$

其中 S_{core} 为纤芯面积, S_{clad} 为内包层面积。而信号光的重叠因子由 LP_{01} 模在纤芯内的填充面积决定。假设光纤中的上能级和基态的粒子数之和是光纤的总掺杂粒子数,那么可以写出二能级上能级粒子数方程:

$$\begin{cases} N = N_1 + N_2 \\ \frac{\partial}{\partial t} N_1 = -\frac{1}{\tau_1} N_1 + \frac{1}{\tau_2} N_2 + \omega_{21} N_2 - \omega_{12} N_1 \\ \frac{\partial}{\partial t} N_2 = \frac{1}{\tau_1} N_1 - \frac{1}{\tau_2} N_2 - \omega_{21} N_2 + \omega_{12} N_1 \end{cases}, \quad (3)$$

$$N_2(z) = N(z) \cdot \frac{\Gamma_p \sigma_{ap} \lambda_p (P_p^+ + P_p^-) + \Gamma_s \sigma_{as} \lambda_s (P_s^+ + P_s^-)}{\frac{Ahc}{\tau_2} + \Gamma_p (\sigma_{ap} + \sigma_{cp}) \lambda_p (P_p^+ + P_p^-) + \Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es}) \lambda_s (P_s^+ + P_s^-)}, \quad (4)$$

式中 N_1 代表基态粒子数, ω_{ab} 为由 a 能级至 b 能级的跃迁系数, τ_i 为能级 i 上的粒子数寿命,这里 i 取 1, 2。 A 为光纤的有效模场面积, h 为普朗克常量, c 为光速的大小, λ_p 和 λ_s 分别为抽运光和信号光波长。由以上(1)~(4)式加上对应的边界条件对方程组进行求解便可以得到锥形光纤中的光功率变化。

3.2 光线追迹模型^[43]

如图 2(a)所示,可以通过简单的几何关系看出锥形光纤的角度为

$$\theta = \frac{D_1 - D_2}{2L}, \quad (5)$$

式中 D_1 、 D_2 分别是光纤粗端和细端的内包层直径, L 为光纤的总长度。可以得到光纤任意位置的直径 D 为

$$D(z) = D_1 - 2\theta z. \quad (6)$$

对于任意角度射入的抽运光来说,该束光线在光纤内任意位置 z 的传输角度为

$$\alpha(z) = \frac{\alpha_{\text{in}}}{n_{\text{clad}}} + 2\theta\eta(z), \quad (7)$$

式中 α_{in} 是光纤的入射角与光轴的夹角, n_{clad} 为内包层折射率, η 是传输到位置 z 时候在光纤中的反射次数。经过推导光纤中的反射次数并代入(7)式,可以得到简化后的光线传输角度:

$$\alpha = a \sin \left[\frac{D_1}{D_2} \sin \left(\frac{\alpha_{\text{in}}}{n_{\text{clad}}} \right) \right] = a \sin \left[T \sin \left(\frac{\alpha_{\text{in}}}{n_{\text{clad}}} \right) \right], \quad (8)$$

式中 $T=D_1/D_2$ 为光纤的拉锥比例。

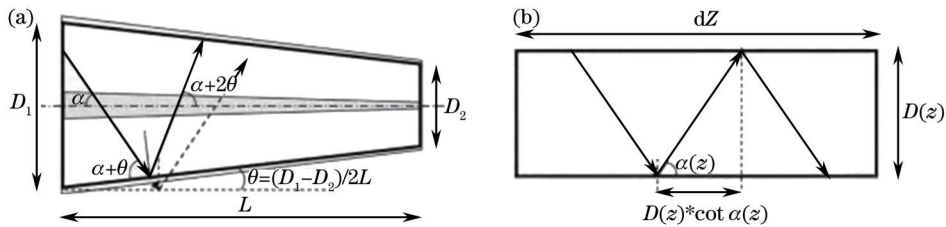


图 2 (a) 锥形光纤示意图; (b) 柱形光纤示意图

Fig.2 (a) Tapered fiber; (b) cylindrical fiber

通过以上推导可以考虑内包层中抽运光泄露的问题。当满足 $n_{\text{clad}} \cdot \sin \alpha < NA$ 的时候是不会发生泄露的 (NA 为数值孔径),而抽运光在光纤传输的过程中,从某一位置开始将不再满足不发生泄露的条件。那么利

用图2中的关系,可以推算出开始发生泄露的光纤位置:

$$\left(\frac{z}{L}\right)_{\text{vgnt}} = \frac{T}{T-1} \left[1 - \frac{n_{\text{core}}(\sin \alpha_{\text{in}}/n_{\text{core}})}{NA} \right]. \quad (9)$$

由(9)式可以通过设计光纤来改变锥形光纤对于抽运光的泄露效果。

4 长拉锥双包层光纤的研究进展

锥形光纤以及其特殊作用伴随着光纤技术的发展而发展,且拉锥光纤的应用也是多种多样的。1995年, Shiraki等^[44]就提出了利用改变光纤芯径的方法来提高受激布里渊散射的阈值。通过改变光纤的芯径,使得光纤内造成受激布里渊散射的声波场频率随光纤的位置而改变,从而成功地将光纤的布里渊增益系数降低。1999年,南安普顿大学的 Alvarez-Chavez等^[45]利用光纤中的锥区来进行选模,其通过在大模场光纤上拉制出半径较细的锥区来将高阶模式泄露掉,以实现选模。2013~2014年,美国马里兰大学的 Pittman等^[12-14]将锥形光纤悬浮在氩气与铷蒸气中实现了超低功率下的非线性效应产生。2013年,深圳大学的郭春雨等^[46]利用纳秒脉冲光纤激光器抽运 145 m 锥形光子晶体光纤,得到了最大输出功率为 2.2 W 的全光纤化白光超连续谱光源。2014年,中国科学院物理研究所的张龙等^[47]利用拉锥式的单模光纤产生超连续谱。2015年,中国石油大学的贾玉磊等^[48]利用锥形光纤产生了跨倍频程的超连续光。长拉锥双包层光纤在光纤激光中应用的最大优点包括:允许使用低亮度光源、抑制非线性效应。

4.1 允许使用低亮度光源

长拉锥光纤的一大优势就是允许使用低亮度的 LD 光源进行抽运。Filippov等^[26]2008年用一段长为 20 m 的长拉锥光纤在其较粗的一端采取空间耦合的方式将低亮度 976 nm 的抽运光源耦合进增益光纤中,如图3所示,图中 HR 和 HT 分别指高反和高透, R 表示反射率。实验中分别采用了对信号光 100% 反射率的反射镜与 4% 的菲涅耳反射镜来实现激光的谐振,并且采用了 2 种不同的 T-DCFs(即 T-DCF1, T-DCF2)。

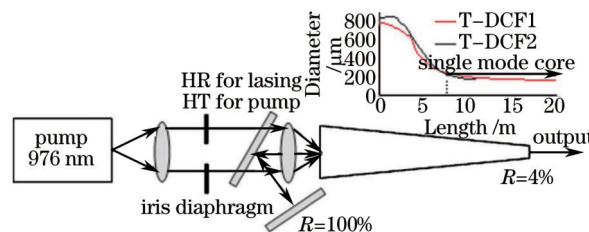


图3 长拉锥光纤激光器示意图。插图为2种T-DCF光纤的芯径随长度变化曲线

Fig.3 Schematic of fiber laser with a T-DCF. Inset shows T-DCF diameter as a function of fiber length

值得一提的是,为了寻找最佳的抽运光输入数值孔径,文中使用了1组光阑来改变输入抽运光的数值孔径,并将其与激光器的斜效率做比较,如图4所示^[26]。由图4中可以看出,抽运光的最佳数值孔径为0.14~0.15。最终实验得到了212 W的单模激光输出,激光器的斜率效率为71.4%。文中指出,若将T-DCF的外包层改为折射率约为1.37的聚合物,那么大芯径端的内包层数值孔径可以达到0.46,实现更低亮度抽运光的抽运。在之后的2010年, Filippov等^[23]采用类似的结构,换用915 nm抽运源,实现了更高的750 W的连续振荡器激光输出。

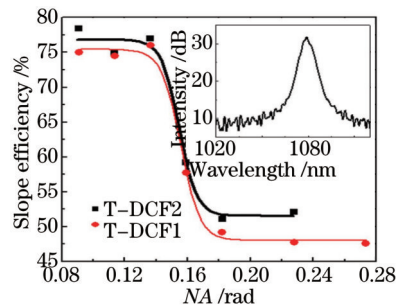


图4 长拉锥光纤激光器斜效率随抽运 LD 数值孔径变化的变化。插图为输出功率为 212 W 时候的光谱

Fig.4 Slope efficiency versus NA of the launched pump radiation for T-DCF. Inset is spectra of output emission at the highest output power of 212 W

2010年, Kerttula等^[22]采用了图5所示结构中在谐振腔中插入声光调制器(AOM)的方法, 利用长拉锥双包层增益光纤获得了脉冲激光输出。图中AR为抗反。同样使915 nm的LD抽运源从长拉锥光纤的粗端通过空间耦合的方式耦合, 在细端和高反镜之间插入声光调制器, 利用声光晶体实现信号光的强度调制, 从而实现脉冲激光的输出。最终在500 kHz的重复频率下获得了脉宽64 ns、脉冲能量1.6 mJ、峰值功率25 kW的脉冲激光输出。

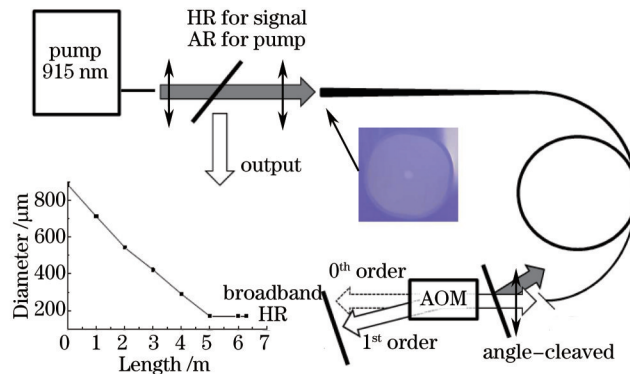


图5 长拉锥双包层光纤脉冲激光器示意图。插图为长拉锥光纤芯径变化图

Fig.5 Schematic of the T-DCF pulsed laser. Inset shows the T-DCF core diameter variation

Kerttula等^[21]在2012年利用长锥形光纤搭建了光纤激光放大器, 获得了较高的增益, 如图6所示, 图中DC combiner为直流功率合成器, FBG为光纤布拉格光栅, LR为低反, CMS为密集 μ 介子电磁螺线管探测器。该装置中种子光采用了自行搭建的线形腔激光振荡器, 种子激光器通过光隔离器后接入放大器的增益光纤的细端中, 放大器增益光纤是总长度为18 m的长拉锥双包层掺镱光纤, 光纤芯径由 $7.5 \mu\text{m}/120 \mu\text{m}$ 变化至 $44 \mu\text{m}/700 \mu\text{m}$ 。放大器抽运光通过空间耦合的形式从增益光纤的粗端耦合进入放大器。为了保护前级种子激光器的安全, 在放大器增益光纤与隔离器之间对包层光滤除, 并通过插入耦合器来监测后向回光。得益于长拉锥双包层光纤本身对于非线性效应与自发放大辐射(ASE)较好的抑制效果和低亮度高功率光源的运用, 最终, 放大器在窄线宽种子输入的条件下获得了25.4 dB的增益、在宽谱种子输入的条件下获得了38.9 dB的增益。

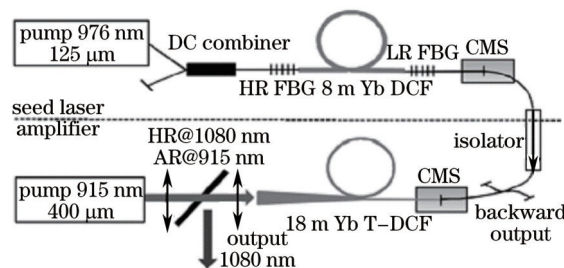


图6 长拉锥双包层光纤在放大器中的应用示意图

Fig.6 Experimental setup for fiber amplifier using T-DCF

4.2 抑制非线性效应

对于锥形光纤来说, 在抑制非线性效应尤其是抑制受激布里渊散射方面有着得天独厚的优势。

众所周知, 受激布里渊散射的产生是由于信号光与光纤中声波场相互作用而产生了传输方向相反于信号光的斯托克斯光的过程, 而产生的斯托克斯光相对于信号光会有一定的频率下移, 频率下移的量与声波场频率是对应的^[7]。从理论上可以计算出光纤芯径与布里渊频移的关系, 如图7所示^[44], 布里渊频移随着芯径的增加而减小。由此说明可以通过改变单根光纤的芯径来实现布里渊频移沿光纤长度的改变, 从而实现提高受激布里渊散射阈值的效果。

2007年, Liu^[38]报道了同时使用非均匀光纤与温度梯度来提高布里渊阈值的实验, 其所使用的光纤的芯径沿长度的分布如图8所示。图8中显示光纤的芯径呈粗细周期性变化, 同时起到了抑制受激布里渊散射和降低光纤弯曲敏感度的作用。实验结果显示, 这种非均匀光纤可以得到千瓦级的单频激光输出, 并且将受激布里渊散射阈值提高了7 dB。

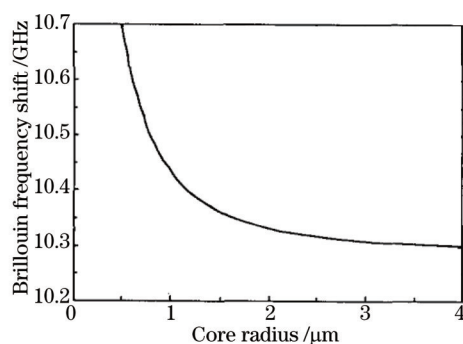


图7 布里渊频移与光纤芯径的关系

Fig.7 Relationship between Brillouin frequency shift and fiber core diameter

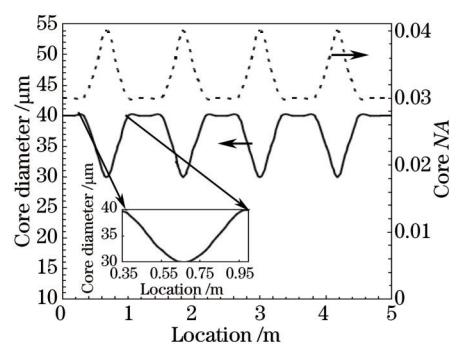


图8 非均匀光纤的芯径与数值孔径变化

Fig.8 Core diameter and NA profile of the non-uniform fiber

除了低亮度光源的运用和非线性效应的抑制外,较好的光束质量也是锥形光纤的优点。2014年,Andrianov等^[36]通过数值模拟的方法研究了啁啾脉冲放大系统中应用长锥形光纤作为增益介质放大后的光束质量变化。计算结果显示,经过锥形光纤放大后,单模输入的光束质量得到了较好的保持。

5 结束语

锥形光纤作为一种特殊的光纤形态已经被使用在了诸如非线性光学、微纳光学、光纤传感、光纤器件等研究领域,另外,利用锥形微纳光纤结合特殊的镀膜(例如拓扑绝缘体或者过渡金属硫化物)可以作为可饱和和吸收体在光纤激光,尤其是超快光纤激光领域发挥作用。而长锥形双包层光纤在光纤激光系统中的应用研究则主要关注于降低热负载和抑制非线性效应。在光纤激光系统中,非线性效应和热负载已经成为了限制光纤激光功率提升的主要因素,但为了解决非线性效应而采用的大芯径短光纤的方案所带来的增益光纤掺杂浓度的提升却为系统的热负载带来了更大的压力。长锥形双包层光纤有希望能够解决这一对矛盾。在近年的研究中,国内外的科研工作者已经从理论或者实验上证实了长锥形双包层光纤在运用低亮度抽运光源和抑制非线性效应上的良好效果,并且在光纤激光放大系统中,锥形光纤作为增益介质也能够较好地保持单模的光束质量。相信在以后的科研工作中,长锥形光纤会被更加广泛地运用到光纤激光系统中,而长锥形光纤的其他特点与最优的形状设计参数则有待于去进一步发掘。

参考文献

- Zhao Xin. High power pulsed laser technology and its application in industry[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013, (4): 141-143.
赵鑫. 高功率脉冲激光技术及其在工业领域的应用[J]. 装备制造技术, 2013, (4): 141-143.
- Cui Li, Zhang Yanchao, He Dingyong, *et al.*. Research progress of high power fiber laser welding[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 154-159.
崔丽, 张彦超, 贺定勇, 等. 高功率光纤激光焊接的研究进展[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 154-159.
- Huang Xiujiang, Liu Yongzhi, Sui Zhan, *et al.*. Development and application of ultrafast pulse fiber laser[J]. J Appl Opt, 2004, 25(6): 16-21.
黄绣江, 刘永智, 隋展, 等. 超短脉冲光纤激光器新进展及其应用[J]. 应用光学, 2004, 25(6): 16-21.
- Limpert J, Roser F, Klingebiel S, *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. J Sel Top in Quantum Electron, 2007, 13(3): 537-545.
- Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives (Invited)[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- Shi W, Fang Q, Zhu X, *et al.*. Fiber lasers and their applications (Invited)[J]. Appl Opt, 2014, 53(28): 6554-6568.
- Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. Waltham, Massachusetts: Academic Press, 2001: 31-62.
- Jauregui C, Eidam T, Otto H, *et al.*. Physical origin of mode instabilities in high-power fiber laser systems[J]. Opt Express, 2012, 20(12): 12912-12925.
- Eidam T, Wirth C, Jauregui C, *et al.*. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. Opt Express, 2011, 19(14): 13218-13224.

- 10 Han Gaofeng. Mode Field Characteristics and Applications of the Tapered Micro-Nano Fiber[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014: 1-4.
韩高峰. 锥形微纳光纤的模场特性及其应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2014: 1-4.
- 11 Yang H, Qiao X, Ali M M, *et al.*. Optimized tapered optical fiber for ethanol (C₂H₅OH) concentration sensing[J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32(9): 1777-1783.
- 12 Pittman T B, Jones D E, Franson J D. Ultralow-power nonlinear optics using tapered optical fibers in noble gases[C]. *CLEO: QELS*, 2014: FTh3D.
- 13 Pittman T B, Lai M, Franson J D. Enhanced transmission for ultra-low-power nonlinear optics experiments using tapered optical fibers in rubidium vapor[C]. *CLEO: QELS*, 2013: QTh1E.
- 14 Pittman T B, Jones D E, Franson J D. Ultralow-power nonlinear optics using tapered optical fibers in metastable xenon [J]. *Phys Rev A*, 2013, 88(5): 53804.
- 15 Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Wei Yan, *et al.*. Spectral characteristics of Bragg fiber grating based on fused taper fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(10): 2565-2569.
江微微, 赵瑞峰, 卫 延, 等. 基于熔融拉锥光纤布拉格光栅的光谱特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2565-2569.
- 16 Yan P, Liu A, Chen Y, *et al.*. Microfiber-based WS₂-film saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(3): 479-489.
- 17 Yan P, Lin R, Ruan S, *et al.*. A 2.95 GHz, femtosecond passive harmonic mode-locked fiber laser based on evanescent field interaction with topological insulator film[J]. *Opt Express*, 2015, 23(1): 154-164.
- 18 Wang Minghuan, Tang Jun, Guo Zebin, *et al.*. Optical model non-reciprocity of microsphere resonator excited by tapered fiber for resonator optic gyroscope[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0305007.
王明焕, 唐 军, 郭泽彬, 等. 锥形光纤微球腔谐振陀螺光学模式非互易性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0305007.
- 19 Fan Qunfang, Liu Ye, Cao Jie, *et al.*. Fabrications for tapered fiber SERS probes with laser-induced chemical deposition method[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0310001.
范群芳, 刘 晔, 曹 杰, 等. 利用激光诱导化学沉积法制备锥形光纤 SERS 探针[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0310001.
- 20 Lægsgaard J. Modeling of nonlinear propagation in fiber tapers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2012, 29(11): 3183-3191.
- 21 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.
- 22 Kerttula J, Filippov V, Chamorovskii Y, *et al.*. Actively Q-switched 1.6-mJ tapered double-clad ytterbium-doped fiber laser[J]. *Opt Express*, 2010, 18(18): 18543-18549.
- 23 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.
- 24 Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, *et al.*. 600 W power scalable single transverse mode tapered double-clad fiber laser[J]. *Opt Express*, 2009, 17(3): 1203-1214.
- 25 Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, *et al.*. Double clad tapered fiber for high power applications[J]. *Opt Express*, 2008, 16(3): 1929-1944.
- 26 Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, *et al.*. Single-mode 212 W tapered fiber laser pumped by a low-brightness source[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(13): 1416-1418.
- 27 Diao Junqiang. Research on an Online Monitoring Method of Optical Power in Every Core in Fiber Tapering[D], Harbin: Harbin Engineering University, 2012: 7-15.
刁君强. 光纤拉锥中纤芯功率在线监测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 7-15.
- 28 Bures J, Lacroix S, Lapierre J. Analyse d'un coupleur bidirectionnel à fibres optiques monomodes fusionnées[J]. *Appl Opt*, 1983, 22(12): 1918-1922.
- 29 Burns W K, Abebe M, Villarruel C A. Parabolic model for shape of fiber taper[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(17): 2753-2755.
- 30 Kenny R P, Birks T A. Control of optical fibre taper shape[J]. *Electron Lett*, 1991, 27(18): 1654-1656.
- 31 Pricking S, Giessen H. Tapering fibers with complex shape[J]. *Opt Express*, 2010, 18(4): 3426-3437.
- 32 Chryssou C E. Theoretical analysis of tapering fused silica optical fibers using a carbon dioxide laser[J]. *Opt Eng*, 1999, 38(10): 1645-1649.
- 33 Tong L, Gattass R R, Ashcom J B, *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 816-819.

- 34 Shi Lei, Chen Xianfeng, Liao Weijun, *et al.*. Fabrication of single-mode fiber wavelength division multiplexer by using improved fused biconical taper method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(4): 501-505.
施 雷, 陈险峰, 廖尉钧, 等. 利用改进的熔融拉锥法制备单模光纤波分复用器[J]. *光学学报*, 2006, 26(4): 501-505.
- 35 Qu Xiqiang, Li Yangjun, Wang Gao. Tapered fiber processing method based on circular heat source[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2006, 16(6): 162-163.
曲喜强, 李仰军, 王 高. 基于环形热源的锥形光纤加工方法[J]. *科技情报开发与经济*, 2006, 16(6): 162-163.
- 36 Andrianov A, Anashkina E, Kim A, *et al.*. Three-dimensional modeling of CPA to the multimillijoule level in tapered Yb-doped fibers for coherent combining systems[J]. *Opt Express*, 2014, 22(23): 28256-28269.
- 37 Kerttula J, Filippov V, Chamorovskii Y, *et al.*. Principles and performance of tapered fiber lasers: From uniform to flared geometry[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(29): 7025-7038.
- 38 Liu A. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient [J]. *Opt Express*, 2007, 15(3): 977-984.
- 39 Yong W, Hong P. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification[J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(10): 2262-2270.
- 40 Yong W. Dynamics of stimulated Raman scattering in double-clad fiber pulse amplifiers[J]. *J Quantum Electron*, 2005, 41(6): 779-788.
- 41 Wang Y. Optimization of pulse amplification in ytterbium-doped double-clad fiber amplifiers[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(6): 2139-2144.
- 42 Zhang Z, Zhou X, Sui Z, *et al.*. Numerical analysis of stimulated inelastic scatterings in ytterbium-doped double-clad fiber amplifier with multi-ns-duration and multi-hundred-kW peak-power output[J]. *Opt Commun*, 2009, 282(6): 1186-1190.
- 43 Filippov V, Kerttula J, Okhotnikov O G. *Tapered Fiber Lasers and Amplifiers*[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2012: 177-232.
- 44 Shiraki K, Ohashi M, Tateda M. Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fibre by changing the core radius[J]. *Electron Lett*, 1995, 31(8): 668-669.
- 45 Alvarez-Chavez J A, Grudinin A B, Nilsson J, *et al.*. Mode selection in high power cladding pumped fibre lasers with tapered section[C]. *CLEO'99*, 1999, 247-248.
- 46 Guo Chunyu, Ouyang Deqin, Ruan Shuangchen, *et al.*. Supercontinuum generation from a tapered photonic crystal fiber pumped with a high-power nanosecond fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0405001.
郭春雨, 欧阳德钦, 阮双琛, 等. 高功率纳秒光纤激光器抽运锥形光子晶体光纤产生超连续谱[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0405001.
- 47 Zhang Long, Han Hainian, Hou Lei, *et al.*. Based on photonic crystal fiber and the taper of single-mode fiber continuous spectrum of experimental research[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(19): 194208.
张 龙, 韩海年, 侯 磊, 等. 基于光子晶体光纤和拉锥式单模光纤的超连续光谱产生的实验研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(19): 194208.
- 48 Jia Yulei, Zhu Zheng, Han Hainian, *et al.*. Ytterbium doped boric acid calcium oxide yttrium femtosecond lasers and in tapered optical fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(5): 054206
贾玉磊, 朱 政, 韩海年, 等. 掺镱硼酸钙氧钇飞秒激光器及在拉锥光纤中产生跨倍频程超连续光[J]. *物理学报*, 2015, 64(5): 054206.

栏目编辑: 王晓球