

文章编号: 0258-7025(2010)09-2235-07

大芯径光纤激光器的新进展

(邀请论文)

楼 棋 洪 周 军 张 海 波 袁 志 军

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 光纤激光的输出功率在十余年内迅速上升,目前连续输出的光纤激光功率已达千瓦以上。由于光纤纤芯可承受功率和光纤纤芯大小有关,而加大纤芯直径会降低光束质量,为了进一步提高光纤激光输出功率而不降低光束质量,一种方法是设计超大模场双层光纤,加大光纤中低阶模的直径;另一种方法是加大光纤的纤芯直径,并用各种方法改进它的光束质量。对以上两种方法进行介绍,并给出一部分实验结果。

关键词 光纤光学;光纤激光器;大芯径;大模场;模式选择;光纤设计;光纤缠绕;光纤拉锥

中图分类号 TN248.1; O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103709.2235

Recent Progress of Large Core Fiber Lasers

(Invited Paper)

Lou Qihong Zhou Jun Zhang Haibo Yuan Zhijun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The output power of fiber lasers increased very fast during the past decades, more than kilowatt can be obtained from single fiber laser. In order to further increase the output power, the core diameter should be increased to avoid the damage of the core surface, but the beam quality will be decreased. In this paper, two methods are introduced: one is to design the large mode field fibers and another is increasing the core diameter with new technology to improve the beam quality. Some experimental results are given in detail.

Key words fiber optics; fiber laser; large core; large mode area; mode selection; fiber design; fiber coiling; fiber tapering

1 引 言

光在光纤中的全反射传输现象在很早就已被发现,早期的光纤由于损耗较大(约 1000 dB/km),除了用于医疗器件中的成像元件外,很难在长距离下使用。20 世纪 70 年代,光纤的损耗下降到 20 dB/km,目前制作的通信光纤的损耗在 1.55 μm 波长已下降到 0.1 dB/km。这一进展带动了光纤通信革命性的变化。瑞典皇家科学院于 2009 年 10 月 6 日宣布,将 2009 年诺贝尔物理学奖授予高锟以及 Wielaard Boire 和 George Smith。高锟在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”取得了突破性的进展,这项成果最终促使光通信系统问世,并为当今互联网的发展铺

平了道路。

随着低损耗光纤的出现,人们开始希望在光纤材料中直接掺杂稀土离子,并获得激光输出。20 世纪 80 年代,采用单模激光二极管作抽运源,在单模光纤中获得数十毫瓦的激光输出,其中工作波长为 1550 nm 的掺铒光纤放大器成为光通信中十分有用的信号放大元件。由于单模光纤纤芯直径十分细小,一般在 10 μm 以下,要将更大的功率注入到光纤纤芯中在技术上遇到了困难,为此,1988 年出现了双包层光纤,它可以保持细小的纤芯尺度,而使抽运光进入数百微米量级的内包层中。这一技术上的突破使光纤激光的输出功率在十余年内迅速上

收稿日期: 2010-03-08; 收到修改稿日期: 2010-05-25

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03Z405)资助课题。

作者简介: 楼棋洪(1942—),男,研究员,主要从事准分子激光器、光纤激光器等方面的研究。

E-mail: qhlou@mail.shnc.ac.cn

升^[1~11],目前连续输出的光纤激光功率已达千瓦以上。由于光纤纤芯可承受功率和光纤纤芯大小有关,为了进一步提高光纤激光输出功率,一种方法是设计超大模场双包层光纤,加大光纤中低阶模的直径;另一种方法是加大光纤的纤芯直径,并用各种方法改进它的光束质量。本文对以上两种方法进行介绍,并给出一部分实验结果。

2 超大模场双包层光纤的设计

传统的双包层光纤仅能在纤芯直径较小时实现单模输出,纤芯尺寸也限制了这种光纤激光器的单模输出功率。那么能不能设计一种光纤,使得它在纤芯直径较大时仍能实现单模输出?这一构想无疑是非常吸引人的,为了实现这一目的,研究人员提出了一些光纤设计的方法。

2.1 螺旋芯光纤

螺旋芯光纤的原理与利用光纤缠绕弯曲进行模式控制的原理类似,所不同的是螺旋芯光纤在光纤拉制时就人为地将纤芯拉制成螺旋状。它是在将预制棒拉制成光纤的同时沿着这个预制棒的中心轴匀速旋转预制棒,拉制出来的螺旋纤芯的螺距就由这个转速所确定。2003年 Soh 等^[12]对螺旋芯光纤的模式损耗做了初步的理论模拟计算,2005年 Jiang 等^[13]对螺旋芯双包层光纤理论做了进一步完善。图1是英国南安普敦大学研究者拉制的螺旋芯双包层光纤。

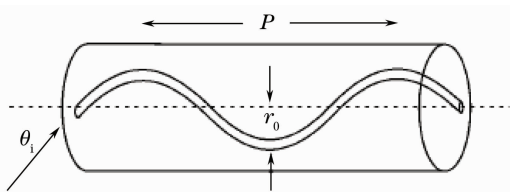


图1 螺旋芯双包层光纤结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a helical-core fiber

2003年 P. Wang 等^[14]率先报道了利用螺旋芯双包层光纤来实现单模输出。他们拉制的螺旋芯双包层光纤纤芯直径 $26\ \mu\text{m}$,数值孔径(NA)0.14(在工作波长为 $1047\ \text{nm}$ 处的归一化频率 $\nu \approx 11$),螺距 P 为 $5.2\ \text{mm}$,偏心率 r_0 为 $130\ \mu\text{m}$,内包层直径为 $400\ \mu\text{m}$,光纤长为 $3\ \text{m}$ 。当抽运功率为 $2.2\ \text{W}$ 时,光纤激光器的输出功率为 $350\ \text{mW}$,光束质量因子 $M^2 < 1.1$ 。2006年,他们利用该方法实现了 $60.4\ \text{W}$ 的单模输出。

2.2 分块包层光纤

为了提高光纤通信系统中光纤的传输效率,V.

Rastogi 等^[15]在2001年提出了一种特殊结构的新颖光纤分块包层光纤(SCF),其截面如图2所示。SCF由纤芯($0 < r < a$)和包层($a < r < b$)组成,纤芯具有均匀的折射率 n_1 ,包层由周期分布的具有角宽度为 $2\theta_1$ 的高折射率区 n_1 介质和角宽度为 $2\theta_2$ 的低折射率区 n_2 介质组成。每一部分的周期和圆周占空比分别为 $\Lambda = 2\theta_1 + 2\theta_2$ 和 $\gamma = 2\theta_2 / \Lambda$,当 $r > b$ 就是空气 $n=1$ 。光纤沿轴向(也就是光波传输的方向)折射率分布是均匀的。

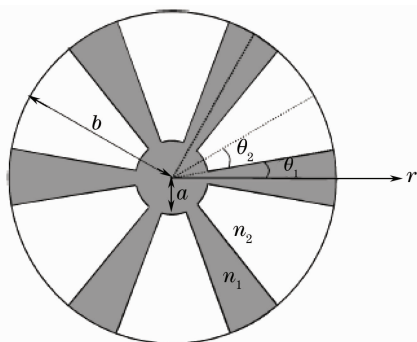


图2 分块包层光纤横截面结构示意图

Fig. 2 Cross section diagram of a SCF

2.3 特种纤芯掺杂光纤

在大模场光纤中,不同模式在纤芯内的分布是不同的,图3为几种低阶模式的截面分布图样。在纤芯径向控制掺杂区域和掺杂离子浓度分布,让基横模得到较大的增益,其他高阶模式增益很小,这样在光纤内形成振荡的就主要是基横模。

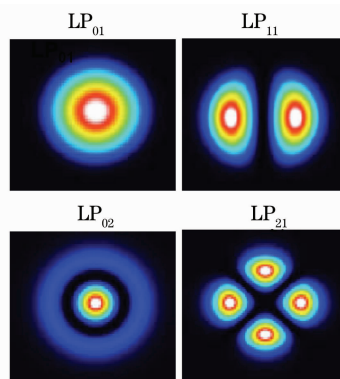


图3 几种低阶模式的截面分布图样

Fig. 3 Profiles of several low-order modes

1998年 H. L. Offerhaus 等^[16]首先提出这种方法,在纤芯掺杂直径为 $40\ \mu\text{m}$ 左右时,获得了光束质量因子 M^2 为 2.0 的激光输出。1999年 J. M. Sousa 等^[17]对稀土离子掺杂的空间分布进行了优化设计,在实验中他们拉制3根光纤,这3根光纤采用相同的阶跃折射率设计,纤芯数值孔径为 0.2 ,内包

层直径为 $125\ \mu\text{m}$ ，纤芯掺 Er，纤芯直径分别为 $5, 12$ 和 $23\ \mu\text{m}$ 。纤芯直径为 $12\ \mu\text{m}$ 和 $23\ \mu\text{m}$ 的 2 根光纤都是多模光纤，但实验结果是都获得了单模输出，输出光束的质量因子 M^2 分别为 1.1 和 1.2 。

2.4 增益导引光纤

传统光纤的纤芯折射率比包层的高，因而光束可以在两者折射率差的限制下进行传输，称为折射率导引光纤。2003 年 A. E. Siegman^[18] 提出增益导引型(GG)光纤的概念，利用不同模式在光纤内具有不同的增益和损耗的特性，达到模式滤除的目的。2006 年，他们报道了一种新型的光纤^[19]，这种光纤利用了折射率导引和增益导引的原理，其与传统光纤最大的区别在于纤芯的折射率比包层的低，它能实现大芯径下的单模输出。从包层来看，纤芯的折射率为负，因而也称为负折射率光纤。

这种光纤的归一化频率 $\bar{\nu}$ 为复数，定义为

$$\bar{\nu}^2 = \Delta N + iG, \quad (1)$$

$$\Delta N = (2\pi a/\lambda_0)^2 2n_0 \Delta n, \quad (2)$$

式中

$$G = (2\pi a/\lambda_0)^2 [n_0 \lambda_0 / (2\pi)] g, \quad (3)$$

$2a$ 为纤芯直径， λ_0 为工作波长， n_0 为纤芯折射率， Δn 为纤芯与包层的折射率差， g 为功率线性增益系数。图 4 为复 $\bar{\nu}$ 平面中 LP_{01} 和 LP_{11} 模的传导区示意图。

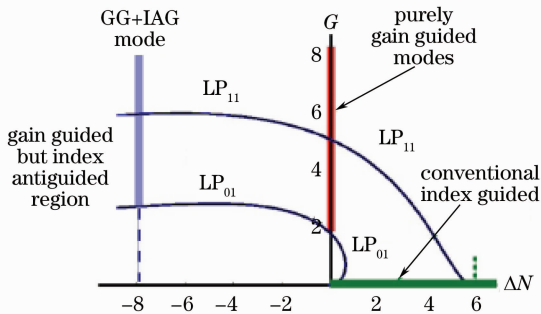


图 4 复 $\bar{\nu}$ 平面中 LP_{01} 和 LP_{11} 模的传导区

Fig. 4 Contours of constant confinement factor G in the complex $\bar{\nu}$ plane for the LP_{01} and LP_{11} mode

图 4 中的实轴为传统的折射率导引光纤，当 $\Delta N = 0$ (即 $\Delta n = 0$) 时，即为虚轴，只有增益导引来实现模式的传输。在复平面的其他区域， LP_{01} 模能在下面一条实曲线上方实现传输，而 LP_{11} 模只能上面一条实曲线上方进行传输。这就意味着只要在两实曲线间的区域选取适当的参数，就能实现 LP_{01} 的单模振荡。

他们设计的光纤包层折射率为 1.5734 ，纤芯直径 $100\ \mu\text{m}$ ，掺 Nd，折射率为 1.5689 ，比包层低约 0.35% ，光纤长度 $10\ \text{cm}$ 。谐振腔为 F-P 腔，采用脉冲 Xe 灯进行抽运。抽运能量为 $76\ \text{J}$ 左右时，获得了

$0.75\ \text{mJ}$ 的 $1052\ \text{nm}$ 激光输出，光束质量因子 $M^2 \leq 2$ 。

3 大芯径光纤激光器的模式控制技术

为尽量抑制大模场多模光纤激光器中的高阶模振荡，得到所需的基横模输出，各国研究人员采用了各种模式控制方法。这些方法可以归纳为两类，一类是对已控制完成的光纤进行模式控制，简称为外部控模技术；另一类是对光纤的内部结构进行设计然后控制，拉制成的光纤具有比常规光纤大的纤芯尺寸，同时保证单模输出。在这两类技术中，其中很多技术相互间是兼容的，可以同时采用两种或多种技术共同使用达到最佳输出。

外部控模技术是对已有的大模场多模光纤激光器进行模式控制，抑制高阶模在腔内的振荡，以期获得基横模激光输出^[20]。采用特殊腔结构、光纤缠绕弯曲和光纤拉锥等方法来进行模式控制的都属于这一类。

3.1 特殊腔结构法

在大模场多模光纤外加上光学元件构成激光谐振腔，利用特殊设计的外腔结构，使其中的高阶模式产生高损失，而只允许基模在腔内形成振荡，最后实现单模输出的目的。1996 年 U. Griebner 等^[21] 采用特殊的外腔，用一根长 $13\ \text{mm}$ 的多模光纤，实现了多模掺 Nd^{3+} 光纤激光器的近衍射极限输出。其实验装置如图 5 所示。

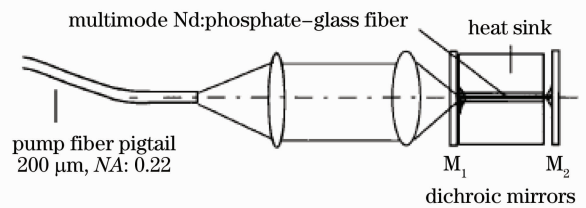


图 5 激光二极管抽运掺 Nd 光纤激光器实验示意图

Fig. 5 Experimental setup of the laser diode-pumped Nd-doped fiber laser

实验采用的多模掺 Nd^{3+} 光纤纤芯直径约为 $100\ \mu\text{m}$ ，数值孔径为 0.44 ，在 $1053\ \text{nm}$ 工作波长能支持超过 1000 个横模的振荡。 $908\ \text{nm}$ 激光二极管抽运光由尾纤输出后经过准直聚焦，直接注入光纤。抽运端的双色镜对激光波长 $1053\ \text{nm}$ 高反，对抽运光 $908\ \text{nm}$ 高透，透射率大于 93% ，输出端的双色镜对 $1053\ \text{nm}$ 激光的反射率为 96.8% ，在抽运端光纤端面与双色镜 M_1 紧挨在一起，而光纤输出端面与双色镜 M_2 之间有一定距离。对于不同的激光模式，从光纤输出端出射后的菲涅耳(Fresnel)衍射损

耗 γ 是不同的,其大小跟光纤输出端面与双色镜 M_2 间的距离 d_z 有关, $\gamma_m = m^2 \lambda d_z / w_0^2$ 。

当 d_z 为 $150 \mu\text{m}$ 时,基横模 ($m=1$) 的 Fresnel 衍射损耗约为 0.4% ,而高阶模式的 Fresnel 衍射损耗均大于 1.0% ,因而可以有效实现高阶模的甄别。

中国科学院上海光学精密机械研究所通过采用凹面外腔技术,在粗芯多模双包层光纤中获得了高光束质量的激光输出。对于较粗的多模纤芯的双包层光纤,其激光模式非常差,不是单模输出。根据光波导理论,光纤中低阶模和高阶模的差别就在于发散角的大小,低阶模的发散角接近于光在自由空间传播时光纤纤芯直径决定的衍射角,所以,采用限制传播方向的谐振腔,通过选模,可以使光纤激光成为单模。为此把平面双色片更换为一个中心镀膜凹面镜,膜层对激光高反,对抽运光高透。照射到凹面镜上的激光,只有中心低阶模部分可以返回腔内,形成振荡,因而起到提高光束质量的作用。

实验装置如图 6 所示,二极管激光器发出的准直激光,经空间滤波器、非球面透镜进入光纤进行抽运。中心镀膜凹面镜充当腔镜提供反馈,同时起到限模的作用。输出端的光纤端面充当了另一腔镜,提供 4% 的 Fresnel 反射。

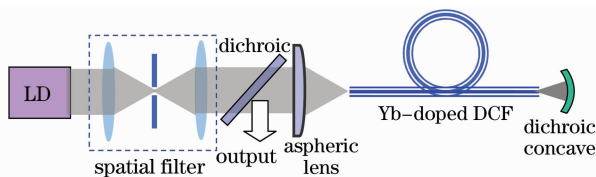


图 6 反向抽运选模实验装置

Fig. 6 Experimental setup for mode selection by backward pumping

采用如图 6 所示的反向抽运结构,利用国产 20 m 双包层光纤进行实验,对应不同镀膜区域的凹面外腔,实现了不同光束质量的激光输出,光束质量因子可从 2.56 改善到 1.3 。所用光纤的参数: D 形内包层尺寸为 $650/600 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.37 ,其芯径尺寸为 $43 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.08 。

3.2 种子光注入法

当种子光源输出激光为基模或单频线偏光时,将其直接注入到多模掺 Nd^{3+} 光纤中进行放大,最后整个系统可实现近衍射极限的激光输出。1999 年 I. Zawischa 等^[22]利用主振荡功率放大器(MOPA)技术,采用多模掺 Nd^{3+} 光纤放大单频种子光,得到了基横模激光输出。

如图 7 所示,单频种子光工作波长为 1064 nm ,

经过两波片后变为单频线偏光,再经准直聚焦系统注入光纤。光纤芯径为 $11 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.16 ,在工作波长 1064 nm 处的 $v \approx 5$ 。内包层直径为 $400 \mu\text{m}$,数值孔径 0.38 ,光纤长度为 30 m 。最后输出激光的光束质量因子 M^2 约为 1.1 。除此之外,其他研究小组也有采用该方法实现单横模输出的报道。这种技术虽然仅用于光纤放大器中,但也是一种很有效的模式选择技术。

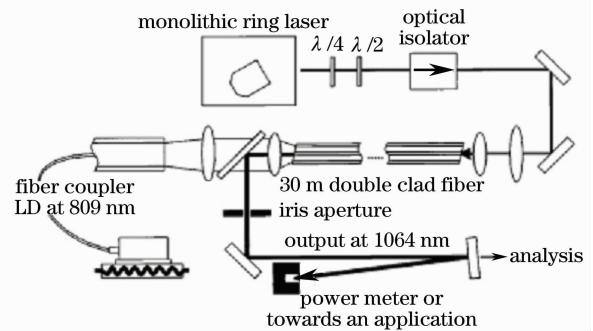


图 7 光纤放大单频种子光实验装置图

Fig. 7 Schematic diagram of single-frequency master-oscillator fiber power-amplifier system

3.3 光纤缠绕弯曲法

在双包层光纤中,只有在纤芯和内包层界面上满足全反射条件的光才能被限制在纤芯内部传输。对于大模场多模光纤,光纤中存在基横模和其他一些高阶模式,它们的传输路径各不相同。在相同的条件下,高阶模式对于缠绕更为敏感。当光纤缠绕至一定大小时,原有波导光中的模式较高的部分在纤芯与内包层界面上将不再满足全反射条件,而通过包层逸出,使得高阶模式的损耗将比基横模高得多。通过图 8 可很直观地看出,在当前缠绕程度下,高阶模式部分能量通过包层逸出,而基横模基本不受影响。

2000 年 J. P. Koplow 等^[23]采用多模光纤放大器,利用光纤缠绕的方法,获得了单模输出。他们将光纤缠绕在一直径可调的圆柱体上,起到分布式空间滤波器的作用,选择合适的圆柱体半径就可以抑制其他高阶模而保持光纤激光器的基横模运行。根据 D. Marcuse^[24]的弯曲损耗理论,对于一定的 LP_{01} 模式损耗 (γ_{01}),他们计算了相应的 LP_{11} 模式吸收系数 ($\gamma_{11} = \alpha_{11} L$, α_{11} 为单位长度的损耗系数, L 为光纤的长度),如图 8 所示。计算采用的是阶跃折射率光纤,纤芯数值孔径 0.08 (典型的低 NA 值双包层光纤),光纤长度 $L = 10 \text{ m}$ 。计算结果表明,对于可以接受的 LP_{01} 模式的弯曲损失,实现高阶模式大于

10 dB 的损耗是可能的,其光纤的芯径可以达到 50~100 μm 的范围(ν 值为 12~14)。与此相应的

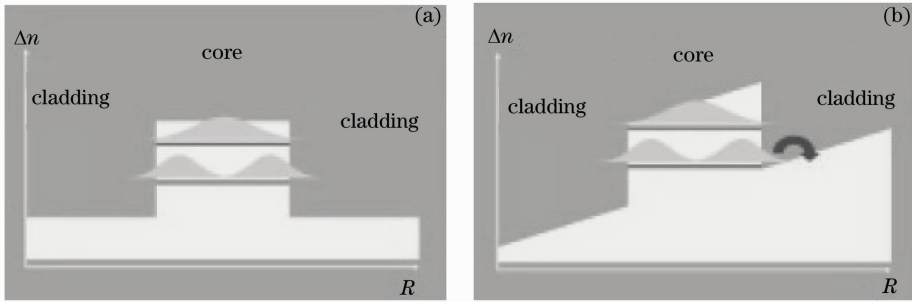


图 8 缠绕光纤中高阶模式的逸出示意图

Fig. 8 Schematic diagram for the filtering of high-order modes in a coiling fiber

实验中,采用的双包层光纤长度为 6 m,纤芯直径为 25 μm ,数值孔径为 0.10(在工作波长 1064 nm 处 $\nu \approx 7.4$);内包层为六角形,外径 200 μm ,数值孔径为 0.47。抽运源是工作波长为 974 nm 的半导体激光器,种子源为 1064 nm 单纵模 Nd:YAG 激光器。缠绕直径为 1.58 cm 时,出射光束质量因子 M^2 为 1.09 ± 0.09 。

这种方法不仅可用于实现连续光纤放大的单模输出,也同样适用于脉冲光纤放大器。国内电子科技大学在 2005 年采用光纤缠绕法,也实现了 0.35 W 的单横模输出,所用光纤纤芯直径为 28.6 μm ,数值孔径为 0.10。

中国科学院上海光学精密机械研究所对缠绕法模式控制技术进行了系统的理论和实验研究。采用常规的端面抽运线形腔结构,以武汉邮电科学院提供的掺 Yb 双包层光纤为激光介质。光纤参数为: D 形内包层尺寸为 650/600 μm ,数值孔径为 0.48;掺 Yb 纤芯直径为 43 μm ,数值孔径为 0.08(在其工作波长 1090 nm 附近的 ν 约为 9.9),长约 8 m。在保持其他条件不变的情况下,实验先后将光纤缠绕在 165 mm 和 52 mm 半径的圆柱体上,然后对激光器的输出性能进行了实验测量。研究表明,对于多模光纤,当其弯曲半径 R 超过 150 mm 时,其附加的弯曲损耗可以忽略不计。所以对于实验所采用的 165 mm 缠绕半径,可近似认为其工作状态与未加缠绕时的工作状态基本相同。

通过实验可知,缠绕半径为 165 mm 和 52 mm 时光纤激光器所对应的光束质量因子 M^2 分别为 2.96 ± 0.10 和 1.38 ± 0.02 ,光束束腰所对应的位置基本没有发生变化;缠绕半径较小时,光束束腰半径减小,但变化幅度不大。实验同时研究了光纤在两种缠绕半径下所对应的激光器输出功率,如图 9 所

弯曲半径通过计算为 1.7~3.7 cm。

示。缠绕半径为 165 mm 时,光纤激光器输出功率相对较大,斜率效率约为 60%;缠绕半径为 52 mm 时,激光器的斜率效率为 48%。当抽运功率为 380 W,缠绕半径为 165 mm 和 52 mm 时光纤激光器的输出功率分别为 217 W 和 160 W。

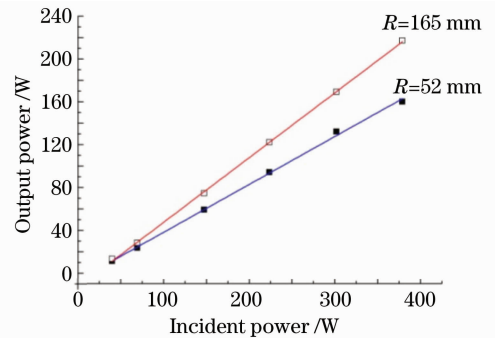


图 9 不同缠绕半径下光纤激光器所对应的输出功率

Fig. 9 Output power versus incident power at different coiling radii

由实验结果可知,采用较小半径($R=52$ mm)弯曲光纤,激光器的光束质量得到了提高,同时其输出功率和斜率效率均有所降低。弯曲半径为 165 mm 时,激光器的弯曲损耗可以忽略不计,因而出射激光束中含有不少高阶模式;当弯曲半径减小为 52 mm 时,一部分高阶模式由于光纤的弯曲,不再满足在纤芯-内包层界面的全反射条件而逸出。高阶模式的逸出一方面使得激光束的光束质量提高,另一方面也使得激光器的输出功率和斜率效率降低。

一般规律认为,光源在单位面积上向某一方向的单位立体角内发射的功率,就称为光源在该方向上的亮度,则激光束的亮度可表示为

$$B = \frac{P}{\Delta S \cdot \Delta \Omega}, \quad (4)$$

式中 P 为激光束的功率, ΔS 和 $\Delta \Omega$ 分别为激光的发

光面积和发射立体角,分别可用激光束腰直径 d_0 和激光束远场发散角 θ 来表示

$$\Delta S = \frac{1}{4} \pi d_0^2, \quad (5)$$

$$\Delta \Omega = \frac{1}{4} \pi \theta^2. \quad (6)$$

将(5),(6)式代入(4)式,可得

$$B = \frac{P}{(\pi^2/16)d_0^2\theta^2} = \frac{P}{(M^2)^2\lambda^2}. \quad (7)$$

将实验所得最大输出功率和光束质量因子代入(7)式,可得

$$\frac{B_{R=52 \text{ mm}}}{B_{R=165 \text{ mm}}} = \frac{160/1.38^2}{217/2.96^2} \approx 3.41. \quad (8)$$

与 $R=165 \text{ mm}$ 相比, $R=52 \text{ mm}$ 时对应光纤激光器的最大输出功率虽然减小了约 26%,但其光束亮度为原来的 3.41 倍。

3.4 光纤拉锥法

将光纤的拉锥部分看成一个模式滤波器(MF),从而实现模式的甄别。这种 MF 理论是 Z. Haas 等^[25]提出的,是在一根多模光纤的两端都对纤芯直接焊接一根单模光纤,目的是为了提高多模光纤的带宽,光波在这根焊接的光纤中传输时,将单模光纤看成一个光学小孔。由于纤芯的直径不同,这个模式滤波器在光纤连接处能够产生高的损耗。后来研究人员看到这个 MF 功能可以用传统的光纤拉锥技术实现,也就是将一根光纤的纤芯尺寸由大变小,光纤的拉锥部分就引入了 MF。在光纤拉锥过程中光纤的芯径与包层一样按同样比例收缩变小,光纤拉锥到什么程度是由拉锥区仅仅支持单模传输而定的,这样光纤的拉锥部分也可看成一个光学小孔,这个小孔大小正好让单模传输,而已经存在

的高阶模式不能通过小孔,最后光纤激光腔中就只有单模振荡输出。

1999年,英国南安普敦大学的研究人员首次采用光纤拉锥实现了大模场多模光纤激光器的准单模输出。他们在光纤激光器的输出端拉制了一个锥形区,拉锥区长度约为 3 cm,直径最小处为 70 μm 。实验所用光纤纤芯直径 15 μm ,数值孔径 0.15(在工作波长 1080 nm 处 $\nu \approx 6.7$),内包层直径 200 μm ,长度为 10 m。实验分别测量了拉锥前后光纤激光器的输出功率和光束质量。拉锥前,光纤激光器斜率效率为 85%,光束质量因子 M^2 为 2.6,最大输出功率 11 W;而拉锥后,光纤激光器斜率效率为 67%,光束质量因子 M^2 为 1.4,最大输出功率 9 W。拉锥后最大功率损失 20%,但其亮度增大为拉锥前的 3.5 倍。

中国科学院上海光学精密机械研究所对拉锥法模式控制技术进行了研究,采用武汉邮电科学院提供的掺 Yb 双包层光纤进行拉锥法模式控制技术实验研究^[26]。光纤的内包层为 D 形 650/600 μm ,数值孔径 0.48;纤芯掺 Yb,直径为 43 μm ,数值孔径 0.08(在其工作波长 1090 nm 附近的 ν 约为 9.9);光纤长度约 12 m。

实验装置如图 10 所示,由于拉锥区对于多模的抽运光有较强的损耗,为实现对光纤的有效抽运,特将拉锥区选在光纤激光器的输出端附近。此外,对于单端抽运光纤激光器而言,其纤芯温度由抽运端至输出端逐渐降低,拉锥区位于输出端附近也能减小热效应对其输出功率的影响。为了便于拉锥后光纤端面的磨平及抛光,在拉锥区后预留了约 10 mm 的未拉锥光纤。

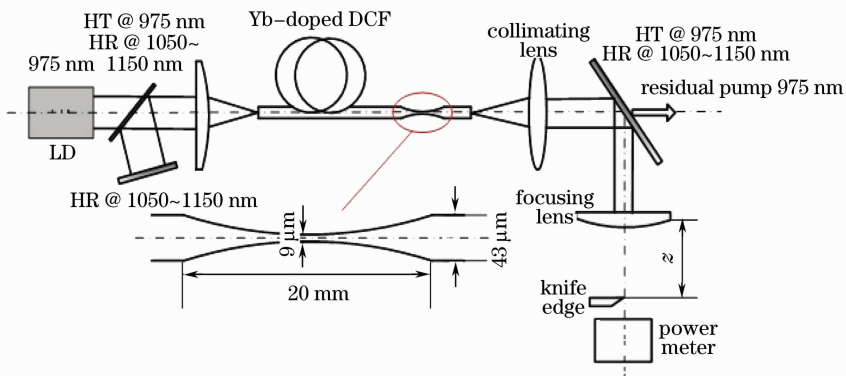


图 10 光纤拉锥进行模式控制实验装置图

Fig. 10 Experimental setup for mode selection by fiber tapering

实验中分别测量了光纤激光器在拉锥前和拉锥后的光束质量因子 M^2 ,拉锥前后其光束质量因子 M^2

分别为 3.06 ± 0.10 和 1.13 ± 0.01 。光束束腰所对应的位置基本没有发生变化,与拉锥前相比,拉锥后光

束束腰半径略有减小,而其发散角则大幅减小。实验同时还测量了光纤激光器在拉锥前后的输出功率,如图 11 所示。拉锥前后光纤激光器的斜率效率分别为 71.8% 和 54.1%,当最大抽运功率为 119.1 W 时,相应的输出功率分别为 77.9 W 和 56.4 W。由于光束质量大大提高,虽然拉锥后其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。

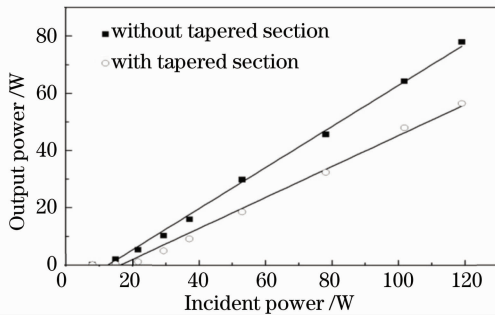


图 11 拉锥前后光纤激光器的输出功率

Fig. 11 Output power of the fiber laser before and after tapering

4 结 论

光纤激光单根连续输出功率已超出功率已超过千瓦。通过优化设计超大模场光纤不仅可以进一步提高光纤输出功率,同时可以保证光纤激光较好的光束质量。而通过模式控制技术可有效抑制大模场光纤激光器中的高阶模振荡,从而可以得到期望的基础输出。实验结果表明进一步提高光纤功率是可行的。

参 考 文 献

- 1 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14): 1158~1160
- 2 V. Gaponstev, W. Kurpke. Fiber lasers grow in power [J]. *Laser Focus World*, 2002, **38**(8): 83~85
- 3 J. Limpert, A. Liem, S. Hofer *et al.*. 150 W Nd/Yb codoped fiber laser at 1.1 μm [C]. CLEO, 2002, **CThx1**: 590~591
- 4 楼祺洪, 何 兵, 薛宇豪等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1277
- 5 Qihong Lou, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Fiber lasers and their coherent beam combination [J]. *Opt. & Photon. News*, 2008, **19**(5): 46~51
- 6 Hongming Zhao, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. Characteristic of pulsed fiber laser induced by switching time [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(2): 124~126
- 7 Jun Zhou, Qihong Lou, Lingfeng Kong *et al.*. A 115 W ytterbium-doped fiber laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(6): 1083~1085
- 8 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A antinuous-wave 714 W fiber laser with China-made longe-mode-area double-olad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1119~1120

- 周 军, 楼祺洪, 朱健强等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1119~1120
- 9 Liu Xia, Du Songtao, Xue Yuhao. High repetithon rate nanosecond pulse fiber amplifier based on China-made large-mode-area fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1876~1879
- 刘 侠, 杜松涛, 薛宇豪等. 基于国产大模场面积双包层光纤的高重复频率纳秒脉冲光纤放大器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1876~1879
- 10 楼祺洪, 朱健强, 周 军等. 双包层光纤放大器获得 133 W 高平均功率脉冲激光输出 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 552
- 11 周 军, 潘 蓉, 杜松涛等. 基于 MOPA 方式的 150 W 高重复频率、窄脉宽光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 861
- 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**: 235~242
- 13 Z. Jiang, J. R. Marciante. Mode-area scaling of helical-core dual-clad fiber lasers and amplifiers [C]. CLEO, 2005, **3**: 1849~1851
- 14 P. Wang, L. J. Cooper, R. B. Williams *et al.*. Helical-core Yb-doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **40**(21): 1325~1326
- 15 V. Rastogi, K. S. Chiang. Propagation characteristics of a segmented cladding fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(8): 491~493
- 16 H. L. Offerhaus, N. G. Broderick, D. J. Richardson *et al.*. High-energy single-transverse-mode Q-switched fiber laser based on a multimode large-mode-area erbium-doped [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 1683~1685
- 17 J. M. Sousa, O. G. Okhotnikov. Multimode Er-doped fiber for single-transverse-mode amplification [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(11): 1528~1530
- 18 A. E. Siegman. Propagating modes in gain-guided optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(8): 1617~1628
- 19 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
- 20 Xue Yuhao, He Bing, Wang Wei *et al.*. Hundred-micron core diameter fiber laser and its mode control [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1900~1904
- 薛宇豪, 何 兵, 王 炜等. 百微米芯径光纤激光器及其模式控制技术研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1900~1904
- 21 U. Griebner, R. Koch, H. Schönngel *et al.*. Efficient laser operation with nearly diffraction-limited output from a diode-pumped heavily Nd-doped multimode fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(4): 266~268
- 22 I. Zawischa, K. Plamann, C. Fallnich *et al.*. All-solid-state neodymium-based single-frequency master-oscillator fiber power-amplifier system emitting 5.5 W of radiation at 1064 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(7): 469~471
- 23 J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, L. Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7): 442~444
- 24 D. Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 216~220
- 25 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
- 26 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Mode selection of a tapered large-mode-area fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1625~1628
- 李立波, 楼祺洪, 周 军等. 大模场面积光纤激光器拉锥法模式选择 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1625~1628