

文章编号: 0258-7025(2009)07-1870-06

# 高重复窄脉宽光纤激光器的输出特性实验研究

王雄飞 赵 鸿 朱 辰 李 尧 林信翔 陈三斌

(固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015)

**摘要** 研究了基于主振荡-功率放大(MOPA)结构的高重复窄脉宽光纤激光器的输出特性及影响因素。分析了高功率输出条件下,受激拉曼散射(SRS)对激光增益特性和光谱特性的影响,指出 SRS 是限制光纤激光器功率提高的主要原因。通过扩大增益光纤的有效模场面积、缩短光纤长度,有效抑制了 SRS 的产生,获得了平均功率 64 W,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 14 ns 的脉冲激光输出。分析了光纤弯曲对激光输出特性的影响,结果表明,适当减小光纤的盘绕直径可以在一定程度上改善输出激光的光束质量。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 主振荡功率放大; 受激拉曼散射; 弯曲直径

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1870

## Output Characteristics of High-Repetition-Rate Narrow-Pulse-Width Pulsed Fiber Laser

Wang Xiongfei Zhao Hong Zhu Chen Li Yao Lin Jixiang Chen Sanbin

(National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100015, China)

**Abstract** The output characteristics and their influence factors of a fiber laser with high repetition rate and narrow pulse width based on master-oscillator power amplifier (MOPA) architecture are experimentally investigated. Under the condition of high output power, the impacts of the stimulated Raman scattering (SRS) on the gain characteristics and laser spectrum characteristics are analyzed through experiments. It is pointed out that SRS effect is the main restriction of power increases of fiber laser. By increasing the effective mode-field area and shortening the length of fiber, stimulated Raman scattering is suppressed successfully. The average output power of 64 W is achieved at repetition rate of 50 kHz with a pulse width of 14 ns. Meanwhile, the impacts of the fiber bending diameter on the output characteristics of laser are also experimentally investigated. The results show that reducing the diameter of bending properly can improve beam quality of output laser in a certain extent.

**Key words** lasers; fiber laser; master-oscillator power amplifier; stimulated Raman scattering; bending diameter

## 1 引言

纳秒级高峰值功率激光器一直是工业和医学领域迫切需求的激光器件,特别是高重复频率、窄脉宽激光器已成为工业微加工领域炙手可热的产品<sup>[1]</sup>。主振荡-功率放大(MOPA)结构的掺镱光纤激光器,利用强抽运的光纤放大器放大主振荡器产生的脉冲信号,可获得高峰值功率、高重复频率的脉冲激光输出。这种方式能将双包层光纤的结构和技术优势与

功率放大器的特点相结合,加之其防振、结构紧凑和无需水冷等优点,使其成为一种极具发展前景的激光器结构。

鉴于 MOPA 光纤激光器的诸多优点,近年来,世界主要的光纤激光器生产企业及研究机构都在该项技术上投入巨资,开展了相关研究工作<sup>[2~7]</sup>。2002 年,德国 Jena 研究所的 J. Limpert 等<sup>[8]</sup>利用 MOPA 技术,获得了平均功率 100 W,光束质量近衍射极限的脉冲激光输出,重复频率 50 kHz,脉冲

收稿日期: 2008-12-22; 收到修改稿日期: 2009-02-12

基金项目: 国家重点实验室基金(9140C0402030802)资助项目。

作者简介: 王雄飞(1984—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器及放大器方面的研究。

E-mail: nufen\_127@163.com

导师简介: 赵 鸿(1969—),男,研究员,硕士生导师,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: zhaohong\_2000@263.net

宽度 90 ns;2006 年,美国 IPG 公司实现了平均功率 200 W,脉冲宽度 280 ns,单脉冲能量 10 mJ 的激光输出<sup>[9]</sup>;2007 年,IPG 公司又报道了平均功率达 500 W 的 YLP-HP 系列脉冲光纤激光器产品,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 200~1000 ns<sup>[10]</sup>。与国外相比,国内的研究工作也取得了巨大进展,2005 年,中国科学院上海光学精密机械研究所国产掺镱双包层光纤作为放大介质,以调 Q 脉冲激光器作为种子源,在种子光功率 1 W,重复频率 100 kHz 的条件下,获得了脉冲宽度 400 ns,平均功率 133.8 W 的激光输出<sup>[11]</sup>。

值得注意的是,尽管这些研究成果获得了较高的输出功率,但脉冲宽度普遍较宽,一般在百纳秒量级,不能充分满足工业和军事领域对高功率激光的需求。因此,在保证较高输出功率的条件下,如

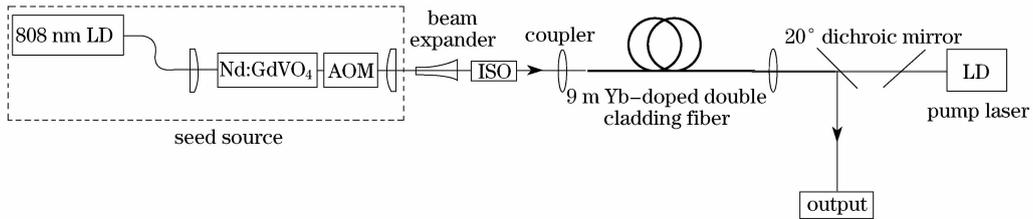


图 1 脉冲光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of pulsed fiber laser

示。种子源为自行研制的小型激光二极管(LD)抽运声光 Q 开关 Nd : GdVO<sub>4</sub> 激光器,其抽运源采用最大输出功率 20 W 的激光二极管,通过光纤耦合输出对 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体进行端面抽运。Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体和传统的 Nd : YAG 相比,具有较高的吸收系数和较大的受激发射截面( $7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ),同时其热导率( $11.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )很接近 Nd : YAG( $13 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ),从而保证了 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体在较高抽运功率下可产生较小的热透镜效应<sup>[12]</sup>。在结构设计上,种子源利用声光 Q 开关腔内调制,并采取压缩腔长的措施,使得信号光的脉冲宽度保持在 20 ns 以内;同时,种子源采用了腔内小孔选模的方法优化输出激光的光束质量。最终,经过稳定性测试,当抽运功率为 12 W 时,实现了波长 1063.2 nm,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 14.5 ns,平均功率 2 W 的脉冲激光输出,光束质量  $M^2$  为 1.6。

信号光输出后,经过光隔离器,由光学耦合系统耦合进增益光纤。为了获得最佳的耦合效果,实验中使用 5 维调整架精确调节光纤端面与耦合透镜的位置。系统中的放大级采用后向抽运结构,即信号光与抽运光分别从双包层光纤两端耦合进光纤,这

何窄脉冲宽度,获得高功率的激光输出成为 MOPA 结构脉冲光纤激光器发展的重要方向之一。但由于光纤内非线性效应、自聚焦、光纤端面损伤等因素的影响,要使该类型激光器在技术上实现窄脉宽、高功率激光输出还存在一定难度。

本文在优化 MOPA 光纤激光器结构设计的基础上,研究了高重复频率、窄脉宽掺镱光纤激光器的输出特性,对影响功率提高的受激拉曼散射(SRS)效应进行了实验分析,同时研究了大模场光纤的弯曲直径对输出激光光束质量和输出功率的影响。

## 2 实验装置

实验采用的 MOPA 结构光纤激光器如图 1 所

种结构有利于光纤放大器获得较高的放大倍数和输出功率。抽运源工作波长 975 nm,最大抽运功率 160 W;抽运光通过自行设计的光学耦合系统耦合进双包层光纤的内包层;耦合系统中的 20° 双色镜对 975 nm 的抽运光高透,对 1064 nm 的激光高反。

## 3 实验结果与讨论

由于不同的光纤结构对激光器输出特性有较大影响,为此,实验选用了两种不同芯径的大模场掺镱双包层光纤(YDCF1 和 YDCF2)进行分析研究。两种光纤的纤芯直径分别为 20  $\mu\text{m}$ (YDCF1)和 80  $\mu\text{m}$ (YDCF2),纤芯数值孔径  $d_{\text{NA}}$  均为 0.06,内包层直径和数值孔径均为 400  $\mu\text{m}$  和 0.46。结合光纤的吸收系数进行优化设计后,YDCF1 和 YDCF2 的光纤长度分别定为 9 m 和 4 m。为了防止光纤端面 4% 的非涅耳反射引起自激振荡,双包层光纤的端面被抛磨成大角度斜角。

### 3.1 纤芯 20 $\mu\text{m}$ 的双包层光纤(YDCF1)功率放大特性

选用 YDCF1 构成 MOPA 结构光纤激光器,采用功率计(EPM1000)和示波器(TEK TDS3054)对

输出激光的输出功率和时域特性同时进行监测。由于功率计对一定光谱范围内的激光都会产生响应,因此,当激光光谱中除信号光波长(1064 nm)外还含有其他波长的光波时,功率计上反映的功率变化不仅仅是放大后信号光的变化情况。而用示波器对信号光进行观察时,当输出激光受到影响发生波动,或者其光谱成分发生改变(如非线性效应产生其他波段的脉冲信号),都会明显地观察到脉冲波形的变化(如受激布里渊散射(SBS)引起的自调Q脉冲;SRS效应对脉冲波形以及脉冲电压幅值产生影响<sup>[13~14]</sup>等)。因此,在监测输出功率变化的同时,观察并记录示波器上脉冲波形和脉冲电压幅值的变化,能更为准确地了解信号光波段激光的放大情况。

图2是YDCF1的输出特性曲线,反映了输出功率和脉冲电压幅值随抽运功率的变化情况。从图2中可以看出,当抽运功率大于阈值(6 W)后,输出功率随着抽运功率的升高基本呈线性增长;当抽运功率高于67 W时,尽管输出功率仍在不断升高,但其增幅变缓,有逐渐饱和的趋势。而通过观察脉冲电压幅值的变化曲线可以发现,当抽运功率大于40 W后,脉冲电压幅值的增幅已经开始降低;在抽运功率升至67 W时,其值达到最大,此后,随着抽运功率的升高,电压幅值不再增加,并有逐渐下降的趋势。这说明当抽运功率大于67 W后,尽管输出功率仍在升高,但信号脉冲的增幅已经受到抑制,不能被正常放大。图3是抽运功率60 W时输出激光的脉冲波形,从图3中可以看出,其形状相对于放大前的信号脉冲已经发生明显畸变,这说明此时信号光的放大已受到严重影响。由此可见,当抽运功率升高至一定程度时,信号光的放大会受到抑制,输出激光中除了被放大的信号光外,可能存在其他成分的光波,它不仅影响了光纤对信号光的增益特性,而且会在高抽运功率下占部分输出激光的能量。

为了更清楚地了解激光输出特性的变化,实验中利用光谱仪(YOKOGAWA AQ6317C)对激光光谱进行检测。发现当抽运功率大于22 W时,激光光谱中除了1064 nm的信号光外,在1113 nm附近出现微弱的发射峰(如图4所示)。根据理论推算,石英光纤中的拉曼增益 $g_R$ 有一个很宽的频率范围(达40 THz)<sup>[15]</sup>,拉曼频移 $\Omega_{SRS}$ 为13.5 THz,从而得出SRS的第一级斯托克斯光波波长约为1115 nm。因此,光谱中1113 nm处的发射峰说明受激拉曼现象的出现,但此时两峰强度相差较大(约35 dB),拉曼光谱对信号光影响很小,基本可以忽略

(此时通过功率计或示波器均看不出脉冲信号有明显变化)。随着抽运功率的升高,SRS效应愈发明显,1113 nm处发射峰的强度不断增大,逐渐接近信号光强,如图5所示,此时对应的抽运功率为60 W。而通过与图2中脉冲幅值的变化曲线对比能够发现,信号光强在抽运功率为60 W时的增幅已经减弱,并趋于饱和。这说明正是SRS效应的出现,影响了激光器的放大性能,使得光纤内1064 nm波段的激光能量发生转移,限制了放大后信号光功率的进一步提高。

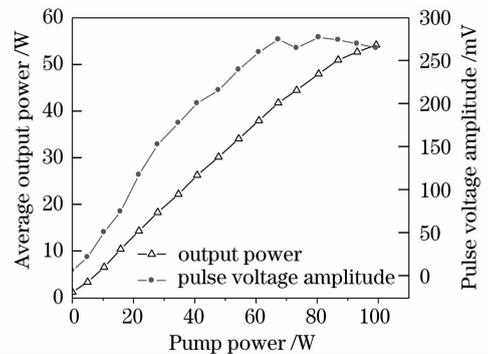


图2 YDCF1输出功率和脉冲电压幅值与入纤抽运功率的关系曲线

Fig. 2 Characteristic curve of the output power and pulse voltage amplitude of YDCF1 as a function of the launched pump power

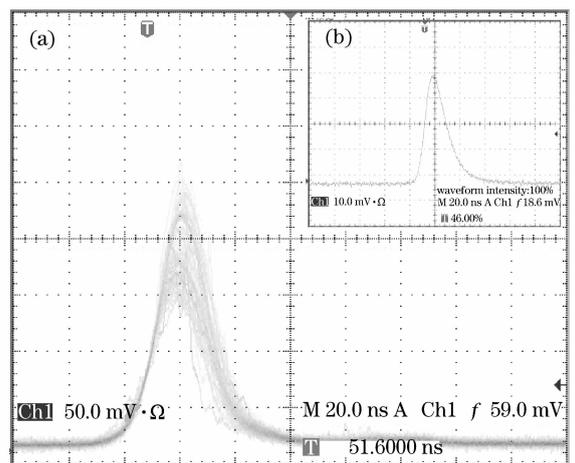


图3 (a)抽运功率60 W时的脉冲图和(b)种子源脉冲图  
Fig. 3 Pulse shape at the launched pump power of 60 W

(a) and pulse shape of laser seed (b)

### 3.2 纤芯80 μm的双包层光纤(YDCF2)功率放大特性

光纤内SRS阈值功率的近似表达式为<sup>[1]</sup>

$$P_{SRS} \approx \frac{16A_{eff}}{Kg_R L_{eff}}, \quad (1)$$

其中, $g_R$ 为拉曼增益, $A_{eff}$ 为有效模场面积, $L_{eff}$ 为有

效相互作用长度,  $L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)]$ ,  $\alpha_p$  为抽运光的吸收系数,  $K$  为极化独立因子。

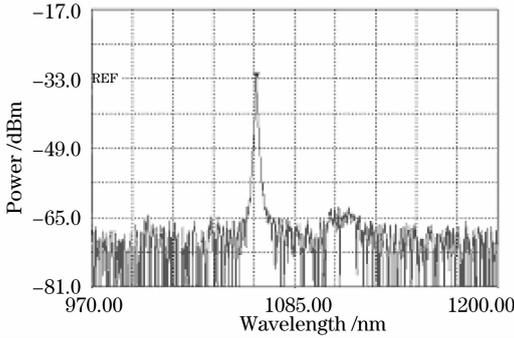


图 4 抽运功率 22 W 时光纤放大器的输出光谱  
Fig. 4 Output spectrum of fiber amplifier at the

launched pump power of 22 W

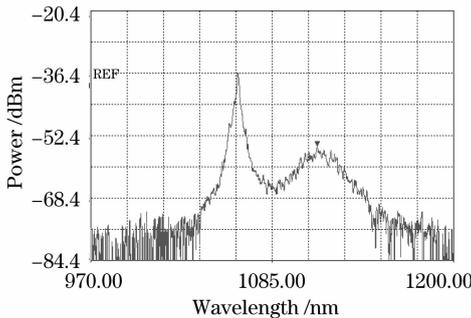


图 5 抽运功率 60 W 时光纤放大器的输出光谱  
Fig. 5 Output spectrum of fiber amplifier at the

launched pump power of 60 W

由(1)式可以看出,增大掺杂光纤有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  和缩短光纤有效相互作用长度  $L_{\text{eff}}$  可以提高 SRS 的阈值功率。因此,在保证其他实验条件不变的情况下,实验中采用了模场面积较大、长度较短的 YDCF2 进行对比实验。图 6 为 YDCF2 的输出特性曲线,可以看出,随着抽运功率的升高,输出功率和脉冲电压幅值均保持线性增长。此外,在输出功率不断升高的过程中,脉冲波形保持稳定,无明显波动;通过对激光光谱的观察,也没有发现 SRS 现象。根据实验结果可以看出,通过增大纤芯直径,以及缩短光纤长度可以有效抑制由于纤芯内功率密度过高而引起的 SRS 效应。因此,在 MOPA 结构的光纤激光器中,为了获得更高功率的激光输出,放大级增益光纤应优先选择纤芯直径较大、长度较短的双包层光纤。

采用纤芯直径  $80 \mu\text{m}$ , 光纤长度 4 m 的 YDCF2 构成 MOPA 结构光纤激光器,当抽运功率为 135 W 时,最终实现了平均功率 64 W,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 14 ns 的脉冲激光输出,斜率效率为 60%。

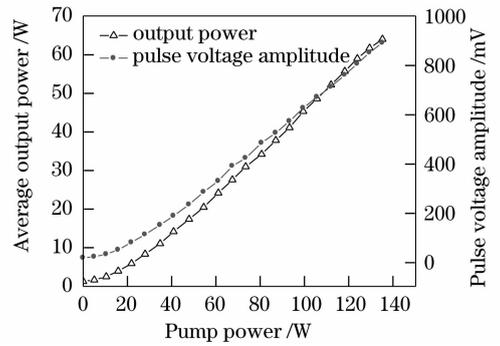


图 6 YDCF2 输出功率和脉冲电压幅值与入纤抽运功率的关系曲线

Fig. 6 Characteristic curve of the output power and pulse voltage amplitude of YDCF2 as a function of the launched pump power

通过对输出功率和脉冲电压幅值的监测,输出激光没有出现增益饱和现象,若能继续增加放大系统的抽运功率,将有可能实现更高功率的激光输出。

此外,实验中没有观测到显著的后向信号光,因此 SRS 效应可以忽略。其主要原因为,种子源线宽较宽(约 100 GHz),远大于布里渊增益带宽(典型值为 10~20 MHz<sup>[16]</sup>),从而有效地抑制了高功率下的 SRS 效应。

### 3.3 大模场光纤光束质量实验研究

光束质量是衡量激光输出特性的另一重要指标,其优劣主要由光纤输出的导波模式决定。光纤属于典型的波导介质,其物理结构与传统的激光晶体不同,因此,其输出的激光模式也与传统固体激光器有所差异。

光纤激光器的输出模式数可以通过归一化频率表达式进行计算<sup>[15]</sup>。当增益光纤为 YDCF1 时,  $V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \frac{2\pi a}{\lambda} d_{\text{NA}} = 3.5414$ ,在纤芯中可能传播的模式有 LP<sub>01</sub> 模 ( $V_c = 0$ ), LP<sub>11</sub> 模 ( $V_c = 2.405$ ) 两种模式,属于近基模输出。利用 Spiricon 公司的 M<sup>2</sup>-200 光束分析仪进行检测,测得输出激光光束质量因子  $M^2 = 1.5$ 。而在 YDCF2 作为增益光纤的实验中,由于纤芯直径较大为  $80 \mu\text{m}$ ,归一化频率  $V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \frac{2\pi a}{\lambda} d_{\text{NA}} = 14.1654$ ,光纤内输出的激光模式增多,通过光束分析仪进行测量,光束质量因子  $M^2$  约为 4。这说明,在实验条件相同的情况下,输出激光的光束质量主要由光纤自身的结构特点(如纤芯直径、数值孔径)所决定。

此外,通过实验发现,YDCF2 输出激光的光束质量对光纤弯曲直径的变化十分敏感,适当减小光

纤的盘绕直径会使光束质量得到改善。因此,为了研究大模场光纤弯曲直径对输出激光光束质量的影响,实验将 YDCF2 的盘绕直径依次定为 18, 14 和 12 cm, 通过种子光放大实验, 分别对输出激光的光束质量进行分析观察。图 7 是 3 种情况下用  $M^2-200$  光束分析仪测得的输出激光光斑图样,  $M^2$  因子

分别为 4.1, 3.6 和 3.0 (对应的光纤盘绕直径为 18, 14 和 12 cm)。由此可以看出, 随着光纤弯曲直径的减小,  $M^2$  因子的数值逐渐降低, 输出激光的光束质量得到改善。分析认为, 改变光纤弯曲直径对输出激光中的高阶模式有较大幅度的抑制, 减少了输出激光的模式数, 从而使光束质量得到提高。

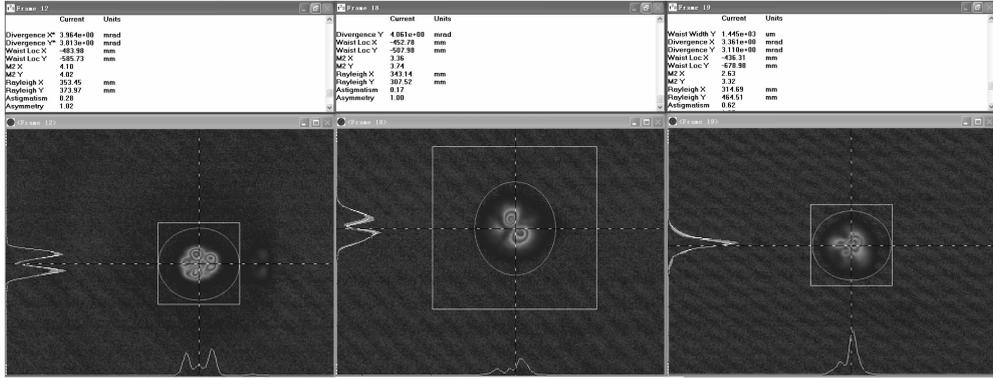


图 7 光纤盘绕直径为 18, 14 和 12 cm 时的光斑图样

Fig. 7 Spot patterns under bending diameters of 18, 14, and 12 cm

图 8 为不同弯曲直径下激光输出功率随抽运功率的变化曲线图, 可以看出, 随着光纤弯曲直径的减小, 激光输出功率有所下降。这说明, 对于芯径较大的大模场双包层光纤, 在减小盘绕直径、改善激光光束质量的同时, 将伴随着一定的功率损失。此外, 通过实验发现, 当光纤弯曲直径减小到一定数值时, 输出功率的下降已不明显, 而此时光束质量也没有明显改善。分析认为, 减小光纤弯曲直径会在一定程度上改善输出激光的光束质量, 但不能从根本上改变由光纤自身结构所决定的激光光束质量特性。而且, 随着抽运功率的进一步升高, 弯曲光纤直径所带来的功率损失会进一步增大, 严重时会出现损坏光纤的现象。

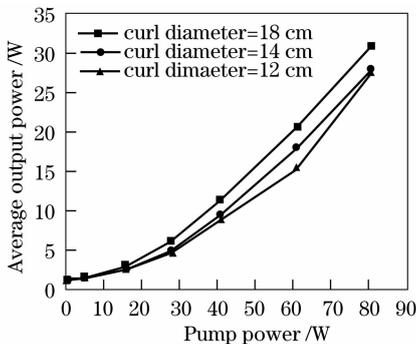


图 8 不同弯曲直径下激光的输出功率

Fig. 8 Output power under different bending diameters

## 4 结 论

利用两种不同芯径的大模体积双包层掺镱光纤, 对 MOPA 结构的高重复窄脉宽光纤激光器的输出特性及其影响因素进行了实验研究。结果表明, SRS 是限制脉冲激光实现高功率输出的决定性因素。高功率输出时, 纤芯内脉冲激光的峰值功率密度很高, 使得部分放大后的信号光发生频率下移转换成斯托克斯光波, 从而影响激光功率的进一步提高。而通过扩大纤芯面积、缩短光纤长度可以有效地抑制 SRS 现象的出现, 提高 SRS 的阈值功率。实验中选用纤芯  $80 \mu\text{m}$  的增益光纤, 对 2 W 的信号光进行单级功率放大, 最终实现了 64 W 的激光输出, 脉冲宽度、激光光谱等参数均很稳定, 没有出现 SRS 现象和其他非线性效应。此外, 实验对大模场光纤弯曲直径与输出激光光束质量、以及输出功率的关系进行了分析研究, 结果表明, 适当减小弯曲直径能抑制光纤内产生的高阶导波模式, 在激光输出功率有所降低的情况下使光束质量得到改善, 但这种方法不能从根本上改变由光纤结构决定的激光光束质量特性。

## 参 考 文 献

- 1 Ryusuke Horiuchi, Hiroaki Sunaga, Kazuyoku Tei *et al.*. High peak power pulse amplification using Yb doped double clad fiber [C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 251~259

- 2 V. Khitrov, B. Samson, D. Machewirth *et al.*. High peak power pulsed single-mode linearly polarized LMA fiber amplifier and Q-switch laser[C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 51~56
- 3 M. D. Mermelstein, K. Brar, M. J. Andrejco *et al.*. All-fiber 194 W single-frequency single-mode Yb-doped master-oscillator power-amplifier[C]. *SPIE*, 2008, **6873**: 68730L
- 4 Jia Xiujie, Guo Zhancheng, Fan Wande *et al.*. Development of completely homemade Yb-doped double-cladding fiber laser with high-power [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2007, **40**(2): 87~90  
贾秀杰, 郭占城, 范万德等. 全国产化掺镱双包层高功率光纤激光器的研制[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2007, **40**(2): 87~90
- 5 Shang Liang, Song Zhiqiang, Mao Qinghe. Experimental-research on output characteristics of high power Yb<sup>3+</sup>-doped double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 755~758  
尚亮, 宋志强, 毛庆和. 高功率掺镱光纤激光器输出特性的实验研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 755~758
- 6 Sun Xinpeng, Zhao Changming, Yang Suhui. Frequency-upconversion luminescence in high-power Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1441~1444  
孙鑫鹏, 赵长明, 杨苏辉. 高功率掺镱光纤放大器中频率上转换发光现象的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(8): 1441~1444
- 7 Chang Liping, Fan Wei, Wang Li *et al.*. Amplification performance of large and small-mode-area ytterbium-doped double-clad fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1492~1497  
常丽萍, 范薇, 王利等. 掺镱双包层光纤放大器的放大特性[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1492~1497
- 8 J. Limpert, S. Hofer, A. Liem *et al.*. 100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**: 477~479
- 9 S. Maryashin, A. Unt, V. P. Gapontsev. 10 mJ pulse energy and 200 W average power Yb-doped fiber Laser [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020O
- 10 <http://investor.ipgphotonics.com/releasedetail.cfm?releaseid=250035>
- 11 Lingfeng Kong, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 133-W pulsed fiber amplifier with large-mode-area fiber [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(1): 010502
- 12 Jin Fengwen, Yu Xin, Li Xudong *et al.*. LD-single-end-pumped A-O Q-switched Nd : GdVO<sub>4</sub> laser with short pulse width at high repetition rate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(4): 512~514  
金凤文, 于欣, 李旭东等. LD单端泵浦 Nd : GdVO<sub>4</sub> 声光调 Q 高重复频率窄脉宽激光器[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(4): 512~514
- 13 Hu Shuling, Zhang Chunxi, Gao Chunqing *et al.*. Stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering effects in ytterbium doped double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 6~10  
胡姝玲, 张春熹, 高春清等. 包层抽运掺镱光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 6~10
- 14 Yong Wang. Dynamics of stimulated Raman scattering in double-clad fiber pulse amplifiers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(6): 779~788
- 15 Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 4~7, 187~191  
Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 4~7, 187~191
- 16 Chen Wei, Zhang Yan, Ren Min *et al.*. Experimental study of single-longitudinal-mode Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1740~1744  
陈伟, 张艳, 任民等. 单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1740~1744