

文章编号: 0258-7025(2010)12-2958-06

长腔全正色散锁模掺镱光纤激光器

赵 慧 柴 路 欧阳春梅 胡明列* 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 报道了一种长腔掺镱锁模光纤激光器。除用以实现自启动锁模的非线性偏振旋转(NPR)元件外,激光器为全单模光纤结构,且腔内无色散补偿元件,工作在全正色散域,仅仅通过引入窄带滤波器参与脉冲整形过程输出耗散孤子。实验中通过延长单模光纤长度实现了两个长腔条件,分别得到了 6.66 MHz 重复频率,12 nJ 单脉冲能量和 5.05 MHz 重复频率,20 nJ 单脉冲能量的稳定锁模脉冲,噪声抑制比均为 75 dB。与以往的全正色散锁模光纤激光器相比,重复频率低,单脉冲能量高,稳定性好,适用于构建简化的光纤啁啾脉冲放大(CPA)系统。

关键词 激光器;全正色散锁模光纤激光器;长腔;单脉冲能量;重复频率

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.2958

A Long-Cavity All-Normal-Dispersion Mode-Locked Yb-Doped Fiber Laser

Zhao Hui Chai Lu Ouyang Chunmei Hu Minglie Wang Qingyue

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A long-cavity mode-locked Yb-doped fiber laser is reported. The laser consists of only single mode fiber (SMF) components except the nonlinear polarization rotation (NPR) parts which are utilized to achieve self-starting mode-locking, and operates at the all-normal-dispersion (ANDi) region since there are no dispersion compensation elements inside the cavity. Dissipative solitons were obtained via the introduction of only a narrow-bandwidth spectral filter into the pulse shaping process. Two long-cavity conditions were implemented by lengthening the SMF, where pulses with 6.66 MHz repetition rate and 12 nJ single pulse energy and those with 5.05 MHz repetition rate and 20 nJ single pulse energy were obtained respectively, both showing a noise suppression ratio of 75 dB on the radio frequency (RF) spectra. Compared to the former ANDi mode-locked fiber lasers, this laser operates at a lower repetition rate with higher single pulse energies and better stability, which should be useful in the construction of a simplified fiber chirped pulse amplification (CPA) system.

Key words lasers; all-normal-dispersion mode-locked fiber laser; long cavity; single pulse energy; repetition rate

1 引 言

近 20 年来,被动锁模光纤激光器^[1~3]作为超短脉冲光源,因其良好的性能、小巧的体积和低廉的价格而

在许多应用领域中成为传统固体激光器的强大竞争对手。如何利用锁模光纤激光器产生高能量的短脉冲成为人们研究的热点之一。在增益介质的选择方面,掺

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-05-14

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806002, 2010CB327604)、国家自然科学基金(60678012, 60838004, 60978022)、高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083, 20070056073)、教育部科技重点项目(108032)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

作者简介: 赵 慧(1985—),女,硕士研究生,主要从事光纤锁模激光器方面的研究。E-mail: rita0315@163.com

导师简介: 柴 路(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事超快激光方面的研究。E-mail: lu_chai@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

镜光纤由于具有量子缺陷小、掺杂浓度高、光-光转换效率高、吸收和发射谱宽等特点更有利于高效率、高能量的短脉冲激光产生,因此受到了广泛的关注。在锁模方式的选择方面,最早出现的孤子锁模^[4]由于受到孤子面积理论和周期性扰动的限制,只能输出小于 100 pJ 的脉冲。为了提高单脉冲能量,人们又相继提出了呼吸孤子锁模^[5,6]和自相似锁模^[7]的光纤激光器。2004 年, Ilday 等^[7]在自相似锁模的掺镱光纤(YDF)激光器中得到了高达 14 nJ 的单脉冲能量。然而,这几种锁模方式都需要在激光谐振腔中引入负的群速度色散(GVD)来提供脉冲压缩机制;而在掺镱介质工作的 1 μm 波段,普通的单模光纤(SMF)只能提供正的 GVD;要想引入负的 GVD,只能利用特种光纤或者光栅对等分离元件,这都不利于激光器的简化。全正色散锁模的掺镱光纤激光器^[8]的提出解决了这一问题。

全正色散锁模光纤激光器的谐振腔内不引入色散补偿元件,因此结构可以很简单。这类谐振腔的净色散量通常较大;在正的 GVD 和自相位调制(SPM)效应的共同作用下形成具有强烈啁啾的宽脉冲,降低了脉冲峰值功率,从而可以使脉冲携带更高的能量而不致于积累过高的非线性相移而分裂^[9]。脉冲窄化主要通过可饱和吸收、增益带宽限制或人为引入的频谱滤波效应等耗散过程实现,因此这种激光器产生的脉冲被称为耗散孤子。Renninger 等^[10]通过数值模拟发现这种脉冲的宽度、啁啾和能量都随腔内净色散量的增加而增大。而在光纤激光器中,单纯增加光纤长度即可获得传统固体激光器中所无法得到的极大色散量;同时,光腔长度的增加意味着锁模脉冲重复频率下降;由光纤波导构成的谐振腔又能够有效降低外界环境不稳定性的影响。因此,长腔的全正色散锁模光纤激光器有望直接输出稳定的高能量、低重复频率的高啁啾宽脉冲。而这正是传统的啁啾脉冲放大(CPA)系统中经过振荡级、展宽器、预放大和脉冲选择器所要达到的目的。因此,长腔的全正色散锁模光纤激光器为实现简化的光纤 CPA 系统提供了可能。2008 年, Renninger 等^[11]利用 60 多米长的环形腔掺镱全正色散锁模光纤激光器产生了 3.2 MHz, 15 nJ 的锁模脉冲。2009 年, M. Zhang 等^[12]利用长达 1.6 km 的线形腔掺镱光纤激光器在全正色散域获得了 191 kHz, 75.2 nJ 的锁模脉冲输出。而以往典型的全正色散锁模掺镱激光器一般工作在几十甚至上百兆赫兹的重复频率下,单脉冲能量只能达到几个纳焦耳甚至更低^[13]。可见长腔的全正色散锁模光纤激光器在降低重复频率、提高单脉冲能量方面具有很大的优势。然而数值模拟也发现,随着脉

冲啁啾量的增加,压缩后的脉冲宽度会逐渐偏离变换极限^[10]。而且过长光纤积累的巨大啁啾很难通过传统的光栅对、棱镜对等方式补偿,因此过长的谐振腔限制了压缩后的脉冲宽度和质量。所以应该根据实际需要,综合考虑所需的脉冲能量、重复频率、脉冲宽度和脉冲啁啾来选择光纤谐振腔的长度。

本文报道了一种环形长腔的全正色散锁模掺镱光纤激光器。该激光器采用非线性偏振旋性(NPR)技术^[14~16]实现自启动锁模;除 NPR 元件外,全部由单模光纤元件构成,结构简单,体积小。实验中通过改变腔长,分别得到了重复频率 6.66 MHz, 单脉冲能量 12 nJ 以及重复频率 5.05 MHz, 单脉冲能量 20 nJ 的基频锁模脉冲序列。噪声抑制比均在 75 dB 左右,具有良好的锁模稳定性。该结果与文献^[11]相比,在近其 2 倍的重复频率下便得到了更高的单脉冲能量;而与文献^[12]相比,该激光器仅利用约为其 1/27 的光学腔长便产生了约为其 1/4 的单脉冲能量,并且由于未采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模,因而不会受到 SESAM 元件破坏阈值的限制,有利于实现高平均功率和高脉冲能量的激光运转。

2 实验研究

2.1 实验装置

图 1 给出了实验搭建激光器的示意图。该光纤激光器全部采用单模光纤;谐振腔内无负色散元件,因此该激光器工作在全正色散锁模域。谐振腔主体由两段 HI 1060 型 SMF 构成:一段记为 SMF1,实验中改变这根光纤的长度,就可以得到不同腔长的结果;另一段长 82 cm,记为 SMF2。增益介质是一段 33 cm 长高掺杂的掺镱单模光纤。偏振无关隔离器(ISO)保证了环形腔内脉冲的单向传输。3 dB 带宽 9 nm 的窄带滤波器(SF)引入频域的幅度调制,从而在该全正色散的激光器中提供耗散孤子锁模机制。Ouyang 等^[17]通过数值模拟证明当 SF 在如图 1 所示的位置时能够得到较高的单脉冲能量。ISO 和 SF 的中心波长均为 1064 nm。由于二者的尾纤均为普通单模光纤,故为方便起见,下文中提到的 SMF1 长度均指的是 ISO 两端尾纤和 SMF1 及 SF 输入端尾纤长度的总和,如图 1 所示。图中自由空间光路由四分之一波片(QWP)、二分之一波片(HWP)和偏振分束器(PBS)构成,长 14 cm。这些偏振控制和选择器件与光纤中的弱双折射和光克尔效应相结合,共同提供 NPR 机制,以实现锁模的自启动。PBS 的导出端作为激光器的输出端,用于监控锁模和测量输出脉冲参数。实验中采用输出功率可调的

980 nm单模台式光源作为抽运源,最大功率 320 mW。抽运光由单模光纤耦合输出,经980 nm /1060 nm波分复用器(WDM)对增益光纤进行前向抽运。

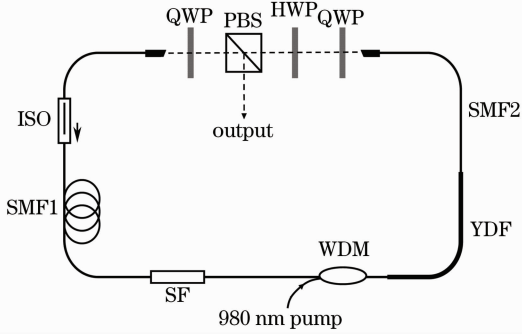


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

2.2 实验结果及分析

首先,取 SMF1 长度为 26.6 m,此时谐振腔总长度约 30 m,计算得到腔内净色散量约为 0.67 ps^2 。通过调节抽运功率和三个波片的角度,很容易得到稳定的基频锁模脉冲序列,重复频率 6.66 MHz,如图 2 所示;锁模的阈值抽运功率约为180 mW。将抽运功率升至

最大的 320 mW,通过仔细调节波片角度得到最大的平均输出功率 80 mW,对应单脉冲能量 12 nJ。锁模脉冲的光谱特征见图 3(a),插图为相应的对数图;可见,脉冲中心波长在 1062 nm 附近,光谱宽度约为 4 nm;两沿处较陡且出现尖峰,符合全正色散域耗散孤子的典型光谱特征^[18]。测量的自相关曲线见图 3(b),经高斯拟合,算得脉冲半峰全宽约为 26.6 ps。计算得时间带宽乘积为 28.37,说明脉冲具有很大的正啁啾。输出脉冲的射频(RF)频谱如图 4 所示,噪声抑制比约为 75 dB。在实验中敲击光学平台也不会失锁,证明该激光器具有良好的锁模稳定性。

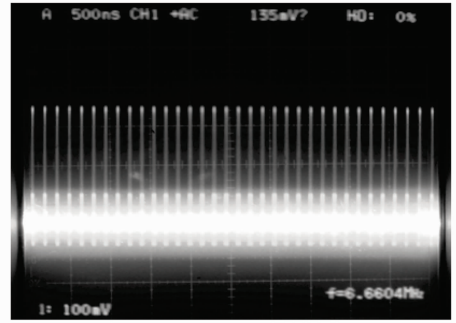


图 2 模拟示波器所示锁模脉冲序列

Fig. 2 Oscilloscope trace of the mode-locked pulse train

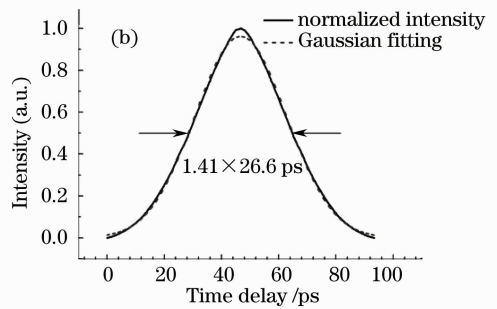
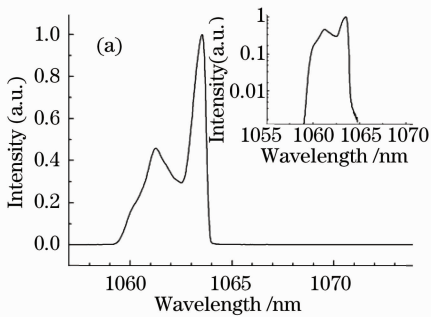


图 3 12 nJ 锁模脉冲输出特性。(a) 脉冲光谱,插图为对数坐标,(b) 脉冲自相关曲线

Fig. 3 Output characteristics of the 12 nJ mode-locked pulses

(a)pulse spectrum. the inset shows the corresponding spectrum on a logarithmic scale

(b) autocorrelation trace of the pulses

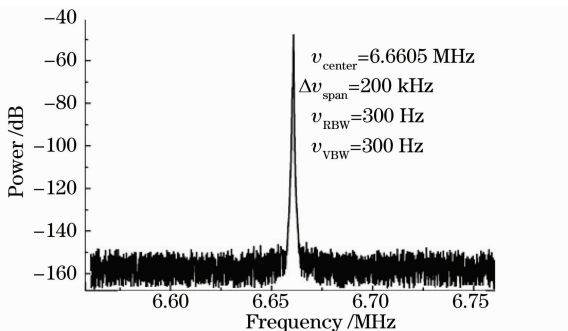


图 4 输出脉冲的 RF 频谱

Fig. 4 RF spectrum of the output pulses

然后,增加 SMF1 到 36.7 m,此时谐振腔总长度约 40 m,计算得到腔内净色散约为 0.91 ps^2 。实验得到重复频率为 5.05 MHz 的基频锁模脉冲序列。当抽运功率到达最大的 320 mW 时,通过仔细调节组合波片,可以获得最大 100 mW 的稳定锁模输出,单脉冲能量达 20 nJ。相应的脉冲光谱和 RF 频谱如图 5(a)和(b)所示,中心波长仍在 1062 nm 附近,光谱宽度约为 3.4 nm,且仍具有正色散域锁模的典型形状。此时激光器噪声抑制比保持在 75 dB,锁模运转稳定。由于现有的自相关仪扫描范围所限,

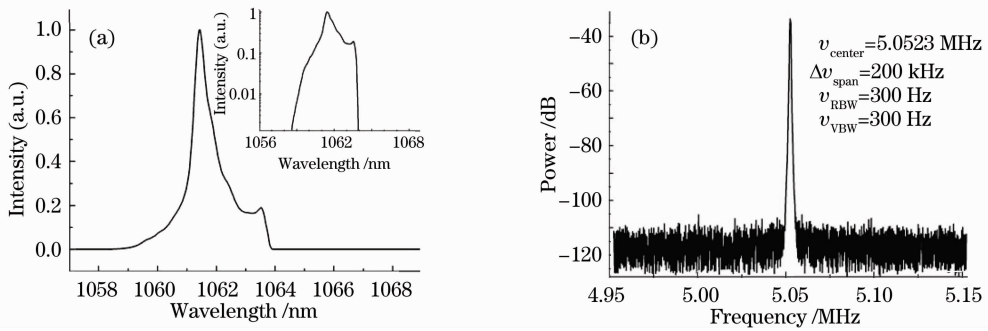


图 5 20 nJ 锁模脉冲输出特性(a) 脉冲光谱,插图为对数坐标, (b) 脉冲的 RF 频谱

Fig. 5 Output characteristics of the 20 nJ mode-locked pulses

(a) pulse spectrum, the inset shows the corresponding spectrum on a logarithmic scale

(b) RF spectrum of the pulses

此时的脉冲宽度无法准确测量。

由以上结果可以看出,与以往工作在几十兆赫兹重复频率下的正色散锁模掺镱光纤激光器相比,完全由单模光纤构成的激光器通过增加 SMF1 的长度,就在 6.66 MHz 的重复频率下产生了 12 nJ 的稳定基频锁模脉冲序列,单脉冲能量有了大幅提高;而进一步增加光纤长度,在 5.05 MHz 时甚至得到了 20 nJ 的脉冲序列。这是由于增加 SMF1 的长度具有两个作用:1)增加了腔内的正色散量,2)延伸了腔长。脉冲宽度随腔内净正色散量增大而不断展宽,因此峰值功率随之下降,能够容许更高的非线性相移积累而不发生分裂,于是能够携带更高的能量;而腔长增加使重复频率降低,也导致单脉冲能量加大。由于实验中使用的抽运源最大输出功率仅为 320 mW,相信采用更高功率的抽运源能得到更高能量的锁模脉冲。

从时间带宽乘积上来看,得到的锁模脉冲带有较大啁啾。这是由于该激光器长的单模光纤引入的正色散很大,净色散量比以往工作在几十兆赫兹重复频率下的锁模激光器大 1~2 个数量级,因此脉冲得到很大展宽。从频域来看,光谱的宽度有限。一方面,这是由于较大的脉冲宽度导致了较低的峰值功率,因此在 SMF2 中由 SPM 效应引起的光谱展宽作用不强;另一方面,该激光器工作的中心波长在 1062 nm 附近,正好处于 YDF 增益带宽的长波边缘附近,使得增益带宽和 SF 的窄带滤波效应共同限制了脉冲的光谱宽度。此外,从对数坐标下光谱图可以更清楚地看到,光谱在长波边一侧较为陡峭,这符合正色散区滤波效应锁模脉冲的光谱特征;而短波边一侧相对变化较缓,在线性坐标下显示更清楚,这偏向于 NPR 锁模得到的高斯型光谱形状。这说明在长腔的全正色散锁模激光器中,NPR 机制在高

啁啾宽脉冲整形过程中也起到了一定的作用。

3 腔内脉冲整形的动力学过程

基于非线性薛定谔方程,采用分步傅里叶方法对激光器锁模动力学过程进行数值模拟^[19]。在稳态下,脉冲在一个腔循环内的时、频域演化过程分别如图 6(a)和(b)所示,其中 SMF1₂ 表示图 1 中 SF 与 WDM 之间的单模尾纤,长 1.5 m;SMF1, YDF 和 SMF2 分别长 27,0.3 和 0.8 m。模拟中为方便起见,设所有器件中心波长与 YDF 增益中心波长重合,均为 1030 nm。该激光器腔内脉冲的整形过程可以理解为 NPR 等效的快可饱和吸收效应从初始的噪声场中提取出较强的脉冲;脉冲经过 YDF 放大以较高的峰值功率入射到单模光纤 SMF2 中,在 SPM 效应作用下积累一定的非线性相移,同时展宽光谱;由于 SMF2 较短,所以图 6(b)中光谱只表现出微弱的展宽。从 SMF2 出射的脉冲经过 NPR 元件,在其等效可饱和吸收作用下得到一定的窄化;而由于脉冲在 SPM 和正色散的共同作用下具有低频的前沿和高频的后沿,因此时域的窄化也对应着频域的窄化,同时由 PBS 耦合输出一部分能量。但是为了维持激光器的稳定运转,耦合输出系数一般较小,即绝大部分脉冲能量被重新耦合入光纤传播。由图中可见,脉冲光谱和脉冲宽度在 SMF1 中都出现明显的展宽,这主要归因于较长的 SMF1 长度。脉冲在其中积累了较大的非线性相移加宽了频谱,持续的正色散作用不断展宽时域脉冲。积累了较大正啁啾的脉冲,在经过窄带滤波器 SF 时,因其积累在两沿的高、低频谱成分被滤掉而在时域上被有效压窄。脉冲通过 SF 后再次进入 YDF,

完成一个腔内循环;该过程循环往复直至所有整形机制的作用达到一个动态平衡,即激光器工作达到稳态,形成稳定的锁模脉冲。由图 6 可见,在稳态下,产生的高啁啾宽脉冲在一个腔循环内具有很小的呼吸比,时、频域演化均比较弱。

在上述模拟中,由于 YDF 和 SF 的中心波长重合而未体现出增益滤波和 SF 滤波的区别。实际上,由于真实谐振腔内 ISO 和 SF 等器件的波长选择作用,使得激光器工作在 1062 nm 附近,而这一

波长刚好处在 YDF 增益带宽的长波边缘部分,使得超出有效增益带宽的频率成分得不到有效的放大,因此便产生了增益滤波效应,使啁啾脉冲在时域上也相应地得到窄化。但是,这里激光器中采用的增益光纤长度很短,而且脉冲在受到光纤增益滤波窄化光谱的同时也因 SPM 展宽光谱,在因增益滤波窄化脉宽的同时也因正色散展宽脉宽,所以增益滤波效应对脉冲的整形作用并不明显。SF 在此高啁啾脉冲的滤波整形中起主导作用。

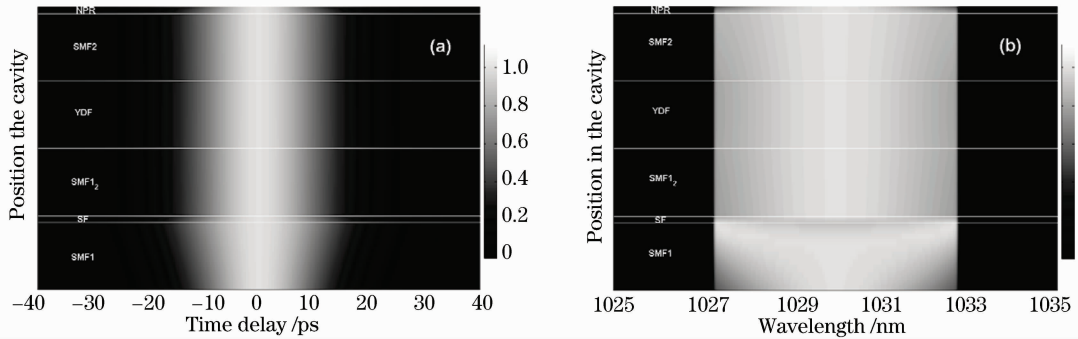


图 6 脉冲腔内演化过程。(a) 时域演化,(b) 频域演化

Fig. 6 Pulse evolution inside the cavity (a) temporal evolution, (b) spectral evolution

4 结 论

实验搭建了一台环形长腔的全正色散锁模掺镱光纤激光器。除用以实现自启动的 NPR 元件外,该激光器全部由单模光纤构成,结构非常简单。在谐振腔中引入了频谱滤波机制;利用正色散,SPM,可饱和吸收,增益滤波和 SF 窄带滤波等效应共同实现脉冲整形。通过改变腔内单模光纤长度,分别得到了 6.66 MHz 重复频率,12 nJ 单脉冲能量以及 5.05 MHz 重复频率,20 nJ 单脉冲能量的基频锁模脉冲,较以往工作在几十兆赫兹重复频率下的全正色散锁模掺镱光纤激光器的单脉冲能量有了较大的提高。输出脉冲的噪声抑制比均在 75 dB 左右,激光器具有良好的锁模稳定性。

参 考 文 献

- Zhong Yihui, Zhang Xuxing, Tao Xiangyang. Research progress of passively mode-locked fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 46~51
钟义晖, 张祖兴, 陶向阳. 被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 46~51
- Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 163~165
王旌, 张洪明, 张 隳 等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 163~165
- Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. Stretched-pulse femtosecond photonic crystal fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*,

2008, **35**(6): 830~834

宋有建, 胡明列, 张 弛 等. 呼吸脉冲锁模的光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 830~834

- K. Tamura, L. E. Nelson, H. A. Haus *et al.*. Soliton versus nonsoliton operation of fiber ring lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(2): 149~151
- K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus. Pulse dynamics in stretched-pulse fiber lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(2): 158~160
- L. Lefort, J. H. V. Price, D. J. Richardson *et al.*. Practical low-noise stretched-pulse Yb³⁺-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(5): 291~293
- F. O. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(21): 213902
- A. Chong, J. Buckley, W. Renninger *et al.*. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 10095~10100
- D. Anderson, M. Desaix, M. Lisak *et al.*. Wave breaking in nonlinear optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(8): 1358~1361
- W. H. Renninger, A. Chong, F. W. Wise. Dissipative solitons in normal-dispersion fiber lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(2): 023814
- William H. Renninger, Andy Chong, Frank W. Wise. Giant-chirp oscillators for short-pulse fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(24): 3025~3027
- M. Zhang, L. L. Chen, C. Zhou *et al.*. Mode-locked ytterbium-doped linear-cavity fiber laser operated at low repetition rate [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(9): 657~660
- Lin Honghuan, Lu Zhenhua, Wang Jianjun *et al.*. Gain-guided solitons in positive dispersion lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5646~5650
林宏奂, 卢振华, 王建军 等. 正色散激光器中的增益导引孤子

- [J]. 物理学报, 2008, **57**(9): 5646~5650
- 14 M. Hofer, M. E. Fermann, F. Haberl *et al.*. Mode locking with cross-phase and self-phase modulation [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7): 502~504
- 15 Deng Yixin, Tu Chenghou, Lü Fuyun. Study of self-similar pulse nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3173~3178
邓一鑫, 涂成厚, 吕福云. 非线性偏振旋转锁模自相似脉冲光纤激光器的研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(5): 3173~3178
- 16 Gao Weiqing, Xu Lixin, Ming Hai *et al.*. Theoretical analysis of passively mode-locked erbium-doped fiber laser with positive dispersion cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 82~86
- 高伟清, 许立新, 明海等. 正色散腔被动锁模掺铒光纤激光器的理论分析[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 82~86
- 17 Chunmei Ouyang, Lu Chai, Hui Zhao *et al.*. Position effect of spectral filter on properties of highly chirped pulses in an all-normal-dispersion fiber laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(10): 1284~1288
- 18 Frank W. Wise, Andy Chong, William H. Renninger. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion [J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2008, **2**(1-2): 58~73
- 19 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. San Diego: Academic Press. 2001. 31~55

792 nm LD 抽运 2 μm 掺 Tm^{3+} 锆酸盐玻璃微片 获得 346 mW 激光输出

随着新型高效激光基质材料的不断出现以及激光二极管(LD)技术的不断提高,LD抽运的固体激光器已逐渐成为激光器发展的主流。目前固体激光器小型化的一个重要方向是微片激光器。微片激光器是一种具有固体微型腔结构的端面抽运激光器件,其典型结构是在激光介质的两个通光端面上分别镀介质膜,形成微型振荡腔。微片激光器是结构最紧凑的固体激光器,具有经济、小型、高效、光束优、寿命长以及调整便利等优点。

2 μm 波段激光位于重要的人眼安全波段,在激光医疗、红外遥感、探测和光电对抗等领域具有重要的应用,是目前中红外激光材料与器件领域研究的热点。

锆酸盐玻璃具有透中红外特性好、基质声子能量低、物化与机械特性优良等特性,是一种理想的激光基质材料。2008年英国 St. Andrews 大学采用 793 nm 连续钛宝石激光器,在掺铥碲酸盐玻璃微片中获得了斜率效率为 28%,输出功率达 124 mW 的 1.9 μm 激光输出。2010年10月,该课题组采用 800 nm 钛宝石激光器抽运,分别在铥单锆酸盐玻璃微片中,获得了输出功率达 190 mW,斜率效率为

50%,中心波段位于 1.952 μm 的激光输出;在 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺碲酸盐玻璃微片中,获得输出功率达 74 mW,斜率效率为 26%,中心波段位于 2.012 μm 的激光输出。上述实验中采用的抽运源均为钛宝石激光器。

我们采用自行研制的 $\text{GeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-BaO-La}_2\text{O}_3\text{-BaF}_2$ 锆酸盐玻璃体系(转变温度 $T_g = 640\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 198.9\text{ }^\circ\text{C}$),在单掺铥锆酸盐玻璃微片中实现了中心波长为 1.995 μm ,光谱宽度为 20 nm 的激光输出。在最大有效抽运功率为 2.27 W 的条件下,获得的最高激光输出功率为 346 mW,斜率效率为 25.6%。实验中采用的抽运源 LD 的中心波长为 792 nm,其尾纤纤芯直径为 200 μm ,数值孔径 0.22。锆酸盐玻璃有效通光长度为 7 mm,两个通光端面分别镀有 792 nm 和 2 μm 波长的高透介质膜。抽运耦合效率为 86%,玻璃有效吸收达到 80%。

张军杰* 徐茸茸 徐林 胡丽丽

(中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)