

高功率全正色散锁模掺 Yb^{3+} 双包层光纤 飞秒激光器*

刘华刚¹⁾ 黄见洪¹⁾ 翁文¹⁾ 李锦辉¹⁾ 郑晖¹⁾ 戴殊韬¹⁾
赵显²⁾ 王继扬²⁾ 林文雄^{1)†}

1) (中国科学院福建物质结构研究所, 中科院光电材料化学与物理重点实验室, 福州 350002)

2) (山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

(2011年10月14日收到; 2012年1月3日收到修改稿)

以芯径为 $30\ \mu\text{m}$ 的掺 Yb^{3+} 双包层光纤为增益介质, 利用非线性偏振旋转技术以及光栅 - 小孔结构组成的光谱滤波器提供有效的振幅调制, 实现了稳定的全正色散耗散孤子锁模运转. 激光器直接输出重复频率为 $76.6\ \text{MHz}$ 、平均功率达 $6.3\ \text{W}$ 的超短脉冲, 单脉冲能量可达 $82\ \text{nJ}$. 直接输出脉冲宽度为 $1.33\ \text{ps}$, 经腔外压缩后的宽度为 $377\ \text{fs}$. 通过调节光栅角度还实现了输出脉冲中心波长在 $1025\text{—}1078\ \text{nm}$ 范围内的调谐.

关键词: 超快激光, 双包层光纤, 非线性偏振旋转, 耗散孤子锁模

PACS: 42.65.Re, 42.81.Dp, 42.55.Wd

1 引言

锁模光纤激光器由于具有结构紧凑、成本低廉、散热效果好以及输出光束质量高等优良特性, 近年来引起了研究者的极大关注并获得了迅速的发展. 随着光纤技术以及锁模技术的不断发展与进步, 光纤激光器输出超短脉冲的性能与部分参数已经达到甚至超过传统的固体飞秒激光器^[1], 有望成为超快激光应用的一种普及化理想光源. 群速度色散 (GVD) 的性质是影响锁模光纤激光器的一个关键因素, 当激光器工作在负色散区时, 腔内的负色散与非线性相移之间的相互作用可以产生稳定的孤子脉冲, 可饱和吸收体在其中仅起到启动锁模和稳定孤子的作用^[2]. 然而这类锁模光纤激光器需要非线性与负色散之间的严格平衡, 其输出脉冲能量局限在几十个 pJ 量级, 提高脉冲能量会打破这种平衡并造成孤子脉冲的分裂^[3]. 通过色散管理方式调节腔内 GVD 的分布, 使净的 GVD 接近于零或

具有较大的正色散时, 可以使激光器实现呼吸孤子锁模^[4,5] 或自相似锁模^[6]. 这种腔内色散管理结构使脉冲在时域上产生周期性的呼吸效应, 可以减小非线性相移的积累, 使普通单模光纤锁模激光器输出单脉冲能量提高到 $10\ \text{nJ}$ 以上. 大量的研究表明, 无需任何负色散补偿, 全正色散的腔内环境也可以获得稳定的锁模输出^[7-11]. 这种锁模激光器通常采用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 或非线性偏振旋转 (NPE) 技术实现锁模自启动, 由于没有负色散补偿机理, 脉冲在正色散和自相位调制 (SPM) 作用下被展宽成啁啾宽脉冲, 光谱滤波效应通过对啁啾脉冲边沿的过滤产生振幅调制, 起到窄化脉冲的作用, 因此光谱滤波效应在全正色散锁模中对稳定锁模以及脉冲的成型发挥重要作用^[12,13]. 全正色散锁模激光器中由于存在光谱滤波等耗散过程, 形成的脉冲又被称为耗散孤子, 腔内正色散展宽脉冲降低了非线性强度, 使得耗散孤子锁模激光器可以支持更大的脉冲能量^[14]. 另一条增大光纤激光器输出功率和能量的途径是改进光纤技术, 其

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 91022034) 和福建省科技重大专项 (批准号: 2010HZ0005-1) 资助的课题.

† E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn

中包层抽运技术使光纤激光器可以利用廉价的多模半导体激光器(LD)作为抽运源,显著地提高了抽运效率和输出功率.应用这种双包层光纤,腔内色散管理^[15,16]以及全正色散结构^[17]相继获得高能量的超短脉冲输出.其中 Kieu 等人利用纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$ 的双包层掺 Yb^{3+} 光纤,在腔内插入滤波片提供振幅调制,实现了全正色散耗散孤子锁模,输出功率为 $2.2\ \text{W}$,单脉冲能量达 $31\ \text{nJ}$ ^[18].近年来兴起的光子晶体光纤(PCF)技术通过提高纤芯的模场面积以降低光纤中的光功率密度,从而降低非线性积累以支持更大的功率和脉冲能量^[19–23],大模面积 PCF 全正色散锁模输出脉冲能量最大达 $265\ \text{nJ}$ ^[20],最大的平均功率超过 $10\ \text{W}$ ^[22,23].

普通双包层单模纤芯直径一般为 $4\text{--}7\ \mu\text{m}$,鉴于大纤芯直径能够支持更大的峰值功率,且实验研究证实单模纤芯直径为 $35\ \mu\text{m}$ 的大模面积双包层光纤可以支持稳定的全正色散锁模^[24].本文采用纤芯直径为 $30\ \mu\text{m}$ 的掺 Yb^{3+} 双包层光纤,利用 NPE 结构作为等效可饱和吸收体,并采用光栅-小孔结构引入腔内光谱滤波效应,在没有任何色散补偿的条件下,实现了大芯径双包层光纤的全正色散耗散孤子锁模.激光器直接输出平均功率为 $6.3\ \text{W}$,单脉冲能量可达 $82\ \text{nJ}$,经腔外压缩后的宽度为 $377\ \text{fs}$.通过调节光栅还实现了输出脉冲中心波长从 $1025\ \text{nm}$ 到 $1078\ \text{nm}$ 波段的可调谐.

2 实验装置

全正色散耗散孤子锁模光纤激光器采用环形腔结构,实验装置如图 1 所示.增益介质为掺 Yb^{3+} 大芯径双包层光纤(LIEKKI Yb1200-30/250DC),纤芯直径为 $30\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.07 ,较大的直径可以有效地降低非线性效应,增大激光器支持的功率和能量.包层直径为 $250\ \mu\text{m}$,数值孔径达到 0.46 ,有利于获得较高的抽运光耦合效率.双包层的结构设计使得这种光纤具有高达 $15.5\ \text{dB/m}(@976\ \text{nm})$ 的抽运光吸收系数.增益光纤取长度为 $1.5\ \text{m}$,弯曲直径为 $6\ \text{cm}$ 以抑制多模,为避免光纤端面反馈形成寄生振荡,端面均进行 8° 角打磨.激光器采用光纤耦合输出大功率 $976\ \text{nm}$ LD 作为抽运源,经非球面镜准直后聚焦到增益光纤, DM_1 , DM_2 为双色镜,用于分离抽运光和信号光. $\lambda/2$ 波片, $\lambda/4$ 波片与偏振分束器(PBS)组合构成 NPE 结构,等效于可饱和吸收元件,同时 PBS 作为输出端口,可通过旋转波片

调节腔内脉冲能量和输出.在激光波长 $1040\ \text{nm}$ 附近, $1.5\ \text{m}$ 的增益光纤总色散约为 $0.033\ \text{ps}^2$,腔内没有色散补偿元件,激光器工作在全正色散域.腔内插入一个光隔离器保证激光振荡的单向传输,光隔离器的通光孔径为 $2.8\ \text{mm}$,作为光阑与光栅一起构成一个光谱滤波器,可实现滤波与调谐功能.

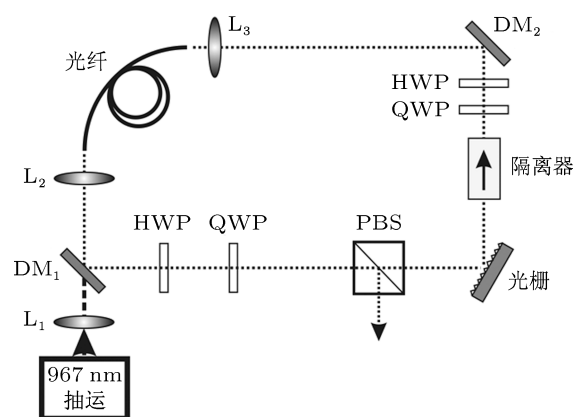


图 1 实验装置示意图 (DM_1 , DM_2 , 双色镜; HWP, 半波片; QWP, 四分之一波片; PBS, 偏振分束器; $L_1\text{--}L_3$, 非球面透镜)

3 实验结果与理论分析

该激光器由 NPE 效应实现锁模自启动,逐步增大抽运光功率并旋转波片调节腔内激光偏振状态和功率大小,当抽运功率达到 $14\ \text{W}$ 时,激光器开始稳定锁模,输出平均功率为 $1.38\ \text{W}$.图 2 为示波器观测的锁模脉冲序列,重复频率为 $76.6\ \text{MHz}$,脉冲间隔为 $13\ \text{ns}$,与 $3.9\ \text{m}$ 的腔长相符合,排除了谐波锁模造成的多脉冲状态.锁模输出平均功率随抽运光功率增大而增大,当抽运功率增加到 $29\ \text{W}$ 时,输出功率可达 $6.3\ \text{W}$,单脉冲能量为 $82\ \text{nJ}$,较之纤芯为 $10\ \mu\text{m}$ 的光纤^[18], $30\ \mu\text{m}$ 的芯径支持更大的功率和脉冲能量.在抽运功率增大过程中,示波器显示激光器会有轻微的调 Q 现象或多脉冲锁模,适当调节波片可使其重新工作在稳定状态.

图 3 是该激光器稳定锁模时的输出光谱,中心波长在 $1048\ \text{nm}$,光谱半极大全宽度(FWHM)为 $5\ \text{nm}$.光谱形状具有陡峭的边沿,且在两端分布着尖峰结构(文献[18]中称之为“cat ears”),这是全正色散耗散孤子锁模输出光谱的典型特征.通过自相关器测量输出脉冲的时域特征,在自相关曲线 $100\ \text{ps}$ 扫描范围内没有发现多脉冲现象.直

接输出脉冲自相关曲线如图 4(a) 所示, 其 FWHM 宽度为 1.33 ps(假设为高斯形状脉冲), 脉冲较宽且具有很大的正啁啾. 经腔外光栅对压缩后的脉冲宽度为 377 fs, 时间带宽积约为 0.515, 接近傅里叶变换极限脉宽, 基底显示其具有未被补偿的非线性啁啾.

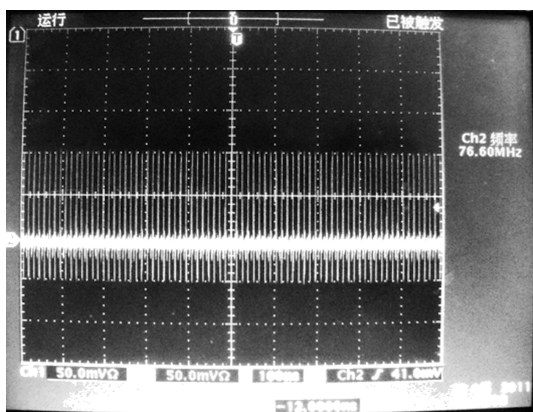


图 2 激光器锁模脉冲序列

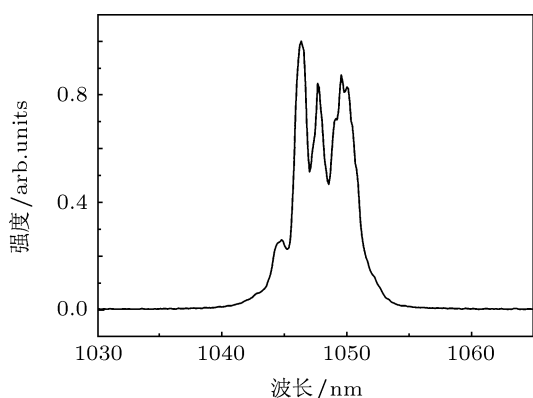


图 3 激光器输出光谱

如图 1 中实验装置所示, 该激光器腔内插入了一个光栅, 它与光隔离器通光孔一起构成光谱滤波器, 这对于获得稳定的全正色散锁模输出起到重要的作用. 用 45° 全反镜代替光栅, 调节 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片, 示波器上只能观察到调 Q 锁模现象, 无法获得稳定的锁模脉冲序列, 表明在如图 1 所示的激光器结构中仅仅依靠 NPE 效应还无法提供足够强的振幅调制以支持稳定的全正色散锁模. 因此, 全正色散光纤激光器中, 通常在腔内插入一个光谱滤波器 [8,12,14] 或者依靠激光增益介质以及偏振元

件的有限带宽实现滤波作用, 光谱滤波通过切削啁啾脉冲的低频和高端边沿将频域上的窄化转化为时域上的窄化效应, 提供附加的振幅调制以支持稳定的耗散孤子锁模. 通过理论计算可以更加深入地分析各因素在锁模中的作用, 脉冲在腔内的演化过程可由 Ginzburg-Landau 方程描述 [12,13]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{g}{2}A - \frac{i}{2}\left(\beta_2 + \frac{ig}{\Omega^2}\right)\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma|A|^2A, \quad (1)$$

式中 A 为脉冲慢变包络振幅, t 为时间量度, z 为传输方向坐标, β_2 是群速度延迟, Ω 和 γ 分别为介质增益带宽和非线性系数, g 是增益系数, 考虑 NPE 的等效可饱和吸收作用, g 可表示为 $g = g_0/(1 + E_p/E_{sat})$, 其中 g_0 是小信号增益系数, E_p 和 E_{sat} 分别为脉冲即时能量和增益饱和能量. 采用分步傅里叶变换算法对方程 (1) 进行数值求解, 通过模拟计算脉冲在腔内循环一周的演化过程, 可得到在腔内不同位置时脉冲宽度的变化, 如图 5 所示. 由于光纤正色散以及 SPM 效应的作用, 脉冲在时域与频域上均被展宽, 形成在时域上具有啁啾特性的宽脉冲, 且脉冲宽度随增益光纤长度单调增大. 要实现稳定的锁模脉冲, 激光腔内需要脉冲压缩机理以平衡脉冲在增益介质中的展宽, 在孤子锁模激光器中是通过引入合适的负色散实现这一功能, 在全正色散锁模激光器中, 则是通过 NPE 与光谱滤波效应的振幅调制作用实现脉冲的窄化. 如图 5 所示, 理论模拟也表明, 在经过 NPE 与光谱滤波作用后, 脉冲宽度得到了不同程度的压缩, 两者共同作用支持稳定的全正色散锁模, 但光谱滤波效应对脉冲的窄化效应更加明显, 表明在这种大模面积光纤中, 非线性较弱的情况下, 光谱滤波效应引起的脉冲窄化被认为在脉冲成型中起主要作用 [18,22]. 这与孤子或色散管理孤子锁模激光器中, 主要依赖于腔内负色散与非线性之间的相互作用的脉冲成型机理有本质的不同. 研究分析可知全正色散耗散孤子锁模过程中存在三种动态平衡: 脉冲在光纤中非线性展宽光谱与滤波效应之间形成频域上的平衡; 而在时域上, 由 NPE 和光谱滤波效应对脉冲的窄化效应, 平衡了正色散介质对脉冲的展宽; 另外, 耗散孤子脉冲在形成中经历耗散过程不断损耗能量, 脉冲需要持续不断的能量供给才能稳定存在 [25], 因此全正色散耗散孤子光纤锁模激光器中同时也存在孤子耗散与增益的稳定平衡.

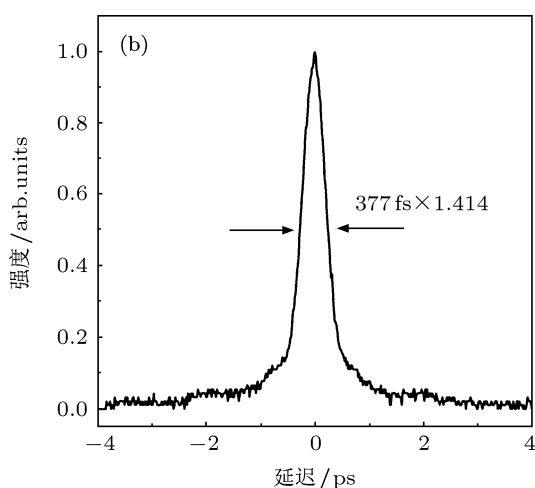
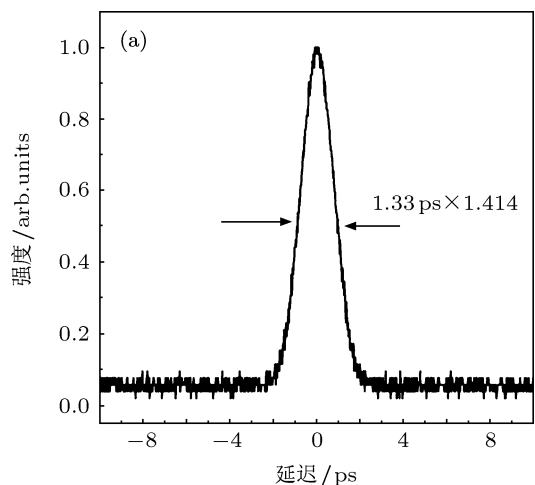


图4 脉冲自相关曲线 (a) 直接输出; (b) 腔外压缩后

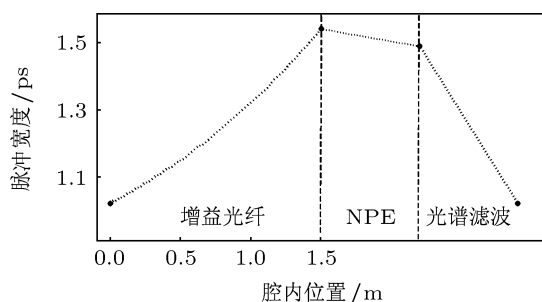


图5 脉冲宽度在腔内不同位置的演化

掺 Yb^{3+} 光纤具有很大的增益带宽, 采用调谐器件可在其增益谱范围内获得波长可调谐的超短脉冲激光器, 这对于需要不同中心波长的超快激光的应用有着重要的意义. 利用腔内双折射滤波效应, 在掺 Er^{3+} 光纤中可以实现波长范围 1570—1600 nm 的可调谐耗散孤子激光器^[26]. 本文报道的

耗散孤子激光器采用光栅与小孔组成光谱滤波器, 除了具有滤波作用之外, 调节光栅角度, 改变通过隔离器通光小孔的波长, 这种滤波器还可以进行锁模波长的调谐. 图 6 是实验观测到的激光器输出光谱, 锁模中心波长覆盖 1025 nm 至 1078 nm 的波长范围. 在调谐过程中, 由于增益以及非线性等条件的变化, 波长改变使锁模处于不稳定状态, 这时需要优化腔内条件, 主要通过旋转波片可以重新建立稳定的单脉冲锁模. 从 1048 nm 向两端调谐时, 输出功率会随调谐范围增大而降低, 在边缘处降至最大功率的 60%左右, 自相关曲线显示, 脉冲宽度也有所加宽, 在 1025 nm 和 1065 nm 时直接输出脉冲宽度分别为 1.37 ps 和 1.34 ps. 这种由光栅和小孔组成的光谱滤波器兼具调谐功能, 波长调节操作方便, 易于实现, 但调节波长时要获得稳定锁模仍需重新优化腔内结构参数, 其调谐的连续性与稳定性还需要在今后的研究工作中进一步的完善和改进.

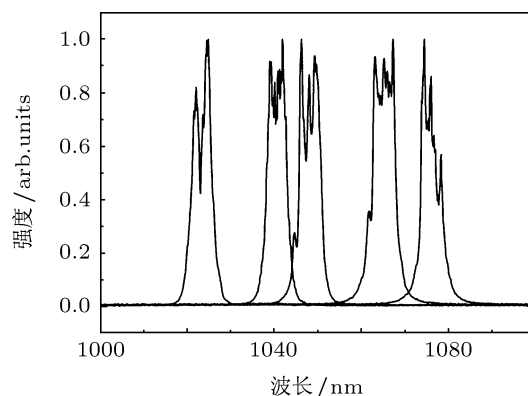


图6 可调谐光谱输出

4 结论

实验研究了掺 Yb^{3+} 双包层光纤的全正色散耗散孤子锁模. 采用纤芯直径为 30 μm 的大模场面积双包层光纤, 比普通双包层光纤支持更高的功率和单脉冲能量, 最高锁模输出功率达 6.3 W, 单脉冲能量为 82 nJ. 激光器通过 NPE 效应和光谱滤波效应实现脉冲的窄化和成型, 以补偿脉冲在正色散介质中的展宽效应. NPE 技术的应用有效地避免了 SESAM 损伤阈值低的缺陷, 为获得更高的锁模功率创造了条件. 由光栅和隔离器孔径构成的光谱滤波器还可以进行锁模激光的调谐, 获得了中心波长从 1025—1078 nm 范围内的可调谐超短脉冲. 在

未来的研究工作中可以通过优化结构参数,改进滤波结构,进一步完善波长调谐功能,或采用更大模场面积的光纤,增加腔长,进一步提升其输出性能.这种全正色散耗散孤子锁模光纤激光器由于输出

功率高、脉冲能量大且结构紧凑,部分性能已可以与传统的固体飞秒激光器相比拟,在超快技术领域有着巨大的应用价值.

- [1] Tünnermann A, Schreiber T, Limpert J 2010 *Appl. Opt.* **49** F71
- [2] Kärtner F, Keller U 1995 *Opt. Lett.* **20** 16
- [3] Tamura K, Nelson L, Haus H, Ippen E 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 149
- [4] Tamura K, Ippen E, Haus H, Nelson L 1993 *Opt. Lett.* **18** 1080
- [5] Ilday F, Buckley J, Lim H, Wise F, Clark W 2003 *Opt. Lett.* **28** 1365
- [6] Buckley J, Wise F, Ilday F, Sosnowski T 2005 *Opt. Lett.* **30** 1888
- [7] Zhao L, Tang D, Wu J 2006 *Opt. Lett.* **31** 1788
- [8] Chong A, Buckley J, Renninger W, Wise F 2006 *Opt. Express* **14** 10095
- [9] Wang L R, Liu X M, Gong Y K 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6200 (in Chinese) [王播然, 刘雪明, 宫永康 2010 物理学报 **59** 6200]
- [10] Cao W J, Xu W C, Luo Z C, Wang L Y, Wang H Y, Dong J L, Luo A P 2011 *Chin. Phys. B* **20** 114209
- [11] Kong L J, Xiao X S, Yang C X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074212
- [12] Chong A, Renninger W H, Wise F W 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 140
- [13] Renninger W, Chong A, Wise F 2008 *Phys. Rev. A* **77** 023814
- [14] Chong A, Renninger W H, Wise F W 2007 *Opt. Lett.* **32** 2408
- [15] Hideur A, Chartier T, Brunel M, Louis S, Zkul C, Sanchez F 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3389
- [16] Ortac B, Hideur A, Chartier T, Brunel M, Zkul C, Sanchez F 2003 *Opt. Lett.* **28** 1305
- [17] An J, Kim D, Dawson J, Messerly M, Barty C 2007 *Opt. Lett.* **32** 2010
- [18] Kieu K, Renninger W, Chong A, Wise F 2009 *Opt. Lett.* **34** 593
- [19] Baumgartl M, Ortac B, Lecaplain C, Hideur A, Limpert J, Tünnermann A 2010 *Opt. Lett.* **35** 2311
- [20] Ortac B, Schmidt O, Schreiber T, Limpert J, Tünnermann A, Hideur A 2007 *Opt. Express* **15** 10725
- [21] Song Y J, Hu M L, Zhang C, Chai L, Wang Q Y 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 1511 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 张弛, 柴路, 王清月 2008 科学通报 **53** 1511]
- [22] Lefrancois S, Kieu K, Deng Y, Kafka J D, Wise F W 2010 *Opt. Lett.* **35** 1569
- [23] Zhang D P, Hu M L, Xie C, Chai L, Wang Q Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 044206 (in Chinese) [张大鹏, 胡明列, 谢辰, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 044206]
- [24] Song Y J, Hu M L, Liu Q W, Li J Y, Chen W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5045 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 刘庆文, 李进延, 陈伟, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 5045]
- [25] Chang W, Ankiewicz A, Soto-Crespo J M, Akhmediev N 2008 *Phys. Rev. A* **78** 023830
- [26] Zhang H, Tang D, Knize R J, Zhao L, Bao Q, Loh K P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 111112

High power all-normal-dispersion mode-locked Yb^{3+} -doped double-clad fiber femtosecond laser*

Liu Hua-Gang¹⁾ Huang Jian-Hong¹⁾ Weng Wen¹⁾ Li Jin-Hui¹⁾ Zheng Hui¹⁾
Dai Shu-Tao¹⁾ Zhao Xian²⁾ Wang Ji-Yang²⁾ Lin Wen-Xiong¹⁾†

1) (*Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 35002, China*)

2) (*Institute of Crystal Materials, Shandong University, Ji'nan 250100, China*)

(Received 14 October 2011; revised manuscript received 3 January 2012)

Abstract

A stable all-normal-dispersion dissipative-soliton mode-locked laser is demonstrated with a Yb^{3+} -doped large-mode-area double-clad gain fiber, and nonlinear polarization evolution and spectral filtering composed of a grating and an aperture are exploited to produce sufficient amplitude modulation to shape pulses of this laser. The laser generates chirped pulses at a 76.6 MHz repetition rate, with an average power of 6.3 W, and a single pulse energy of 82 nJ. Pulse duration of the direct output pulse is 1.33 ps and it can be dechirped to 377 fs after externally compressed. By adjusting the grating, the central wavelength of the output pulses can also be tuned from 1025 nm to 1078 nm.

Keywords: ultrafast laser, double-clad fiber, nonlinear polarization evolution, dissipative soliton mode-locking

PACS: 42.65.Re 42.81.Dp 42.55.Wd

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91022034), and the Science and Technology Major Project of Fujian Province (Grant No. 2010HZ0005-1).

† E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn