

文章编号: 0258-7025(2008)05-0647-04

基于全固型掺镱光子带隙光纤的被动锁模 全光纤环形孤子激光器

欧阳春梅 柴 路 宋有建 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 采用全固型掺镱光子带隙光纤(AS-Yb-PBGF)作增益介质并提供反常群速色散(GVD),设计了一种被动锁模全光纤环形孤子激光器。没有使用任何块状色散补偿元件,因此,该激光器腔型结构简单、紧凑、环境稳定性高,更容易实现全光纤结构。脉冲在激光腔内的传输用广义非线性薛定谔方程描述,并采用分步傅里叶方法数值模拟了该激光器的单孤子运转的动力学过程。计算时,将 AS-Yb-PBGF 的长度选取为 0.4 m,改变激光腔内单模光纤(SMF)的长度,得出了最佳运转参数:当 AS-Yb-PBGF 固定为 0.4 m 时,选择单模光纤等于 0.4 m,就可以实现脉冲宽度为 244 fs,脉冲能量为 14 pJ 和时间带宽乘积为 0.32,即接近傅里叶变换极限的单孤子运转。

关键词 激光器;孤子光纤激光器;分步傅里叶方法;全固型光子带隙光纤

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Passively Mode-Locked All-Fiber Ring Soliton Laser Based on All-Solid Yb-Doped Photonic Bandgap Fiber

Ouyang Chunmei Chai Lu Song Youjian Hu Minglie Wang Qingyue

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

Abstract A passively mode-locked all-fiber ring soliton laser is constructed based on all-solid Yb-doped photonic bandgap fibers (AS-Yb-PBGF), which provide the laser gain and anomalous dispersion simultaneously. Without using any bulk dispersion compensators, the laser cavity is simple, compact, environmentally stable, and easy to achieve all-fiber configuration. By means of the nonlinear Schrödinger equation, the dynamics of single-soliton operation in the laser is numerically simulated and the optimal parameter is obtained with the split-step Fourier method. In the calculation, when the length of the AS-Yb-PBGF was chosen as 0.4 m and the length of single mode fiber (SMF) as 0.4 m, the single-soliton operation with the pulse duration of 244 fs, the pulse energy up to 14 pJ, in which the time-bandwidth product is 0.32 as nearly the transform-limited pulse, has been shown.

Key words lasers; fiber soliton laser; split-step Fourier method; all-solid photonic bandgap fiber

1 引 言

超短脉冲技术在工业、生物、医学及科研等众多领域得到了越来越多的应用。基于块状晶体的传统固体超短脉冲激光器是主要的飞秒激光源。然而,固体超短脉冲激光器由于环境影响较大、体积较大、

抽运源昂贵等不足限制了其在复杂现场的实际应用。伴随着光纤拉制技术的发展,基于光纤的超短脉冲激光器应运而生,并得到快速发展,成为超短脉冲激光器中的重要类型。光纤激光器与传统固体激光器相比具有光束质量好、效率高、阈值低、可调谐、

收稿日期:2007-10-24;收到修改稿日期:2007-11-20

基金项目:国家 973 计划(2003CB314904,2006CB806002),国家 863 计划(2007AA03Z447),国家自然科学基金(60678012)和高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083,20070056073)资助项目。

作者简介:欧阳春梅(1980—)女,黑龙江人,博士研究生,主要从事超快光纤激光器方面的研究与应用。

E-mail:oycm@tju.edu.cn

导师简介:柴 路(1956—),男,天津人,教授,博士生导师,主要从事超短脉冲激光器方面的研究。

E-mail:lu_chai@tju.edu.cn

紧凑小巧、导热性好、可用光电二极管抽运和高性能价格比等优点^[1~5]。目前,在1.5 μm波段全单模光纤(SMF)的被动锁模激光器已经商品化,在光通信领域正在逐步取代传统的固体超短脉冲激光器^[6,7]。但是在1 μm波段,由于传统的单模光纤只能提供正的群速度色散(GVD),因此在该类光纤激光器中补偿增益光纤产生的正啁啾只好采用光栅对提供负的群速度色散^[8]。但是这种分离元件的使用使实现全光纤化的激光器成为难题。随着光子晶体光纤(PCF)的出现^[9~12],使得实芯空气孔光子晶体光纤在1 μm波段可以产生负的群速度色散,这就为在1 μm波段实现全光纤化超短脉冲激光器奠定了物质基础^[13]。但是一般实心光子晶体光纤的芯径很小,作为色散补偿光纤容易引起高非线性效应和受激拉曼效应^[14],从而干扰孤子脉冲的时域和频谱特性,带来不必要的负面影响。一种替代方法是采用具有极小的非线性系数的中空型光子带隙光纤(HC-PBG),但其缺点是与单模光纤熔接时,由于模式不匹配会产生较大的损耗。最近,一种全固型光子带隙光纤(AS-PBGF)问世^[15],为在1 μm波段实现全光纤化超短脉冲激光器带来新的契机。AS-PBGF由在包层的周期结构中掺入Ge等微量元素的石英基质构成,使包层的有效折射率高于石英纤芯的折射率,形成带隙效应导光。而且它的纤芯尺寸也可以做得较大,比前两种光子晶体光纤更适合作为色散补偿元件应用于全光纤激光器中^[16]。如果将增益离子镱(Yb)掺入AS-PBGF就构成了全固型光子带隙增益光纤(AS-Yb-PBGF),该光纤的特点是:既为1 μm波段的增益介质,又能提供负群速度色散的色散补偿元件,这就省略或减少了附加的色散补偿元件,不仅简化了激光腔的结构,而且更容易实现激光器的全光纤化。目前在直腔结构中已经实现了半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模运转^[17]。然而,更有利于实现孤子运转的腔型是环形腔结构^[18]。本文设计了一种基于AS-Yb-PBGF作为增益介质和色散补偿元件,再附加一定长度的单模光纤和非线性偏振旋转(NPE)被动锁模器件,构建了一种简单和紧凑型的被动锁模全光纤环形激光器。通过数值模拟该激光器的腔内群速度色散、自相位调制(SPM)、增益、损耗、增益饱和以及增益色散等综合作用下的脉冲形成的动力学过程,得到了能够实现稳定飞秒级单孤子运转的全光纤激光器的结构参数。

2 激光器模型

本文构建的被动锁模全光纤环形激光器如图1所示。图中AS-Yb-PBGF为掺镱的全固型光子带隙光纤,SMF为传统单模光纤,WDM为提供抽运用的波分复用耦合器,NPE为提供被动锁模的非线性偏振旋转装置。

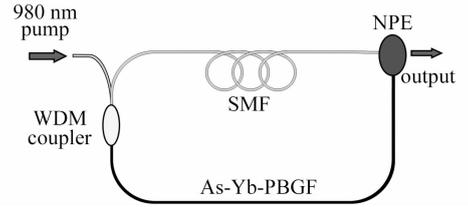


图1 基于AS-Yb-PBGF的环形全光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematics of all-fiber ring laser based on AS-Yb-PBGF

为了讨论超短脉冲在该激光器中的动力学过程,采用非线性薛定谔方程来描述在AS-Yb-PBGF和单模光纤中光脉冲的演化过程,方程为

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = -\frac{i}{2}(\beta_2 + igT_2^2) \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma|A|^2A + \frac{1}{2}(g - \alpha)A, \quad (1)$$

式中 A 为脉冲包络的慢变振幅, Z 为脉冲的传输坐标轴, T 为脉冲的时间量度, β_2 为群速度色散, β_3 为三阶色散(TOD), T_2 为偶极子弛豫时间,与增益带宽成反比, γ 为非线性系数, α 为光纤损耗, g 为增益系数。考虑到增益饱和的作用,增益系数可以表示为

$$g = \frac{g_0}{1 + E_{\text{pulse}}/E_{\text{sat}}}, \quad (2)$$

式中 g_0 为小信号增益系数, E_{sat} 为增益饱和能量, E_{pulse} 为瞬时脉冲能量。

NPE等效为快可饱和吸收体,模拟时采用反射率方程^[19]

$$R = R_{\text{unsat}} + R_{\text{sat}} \cdot [1 - 1/(1 + P/P_{\text{sat}})], \quad (3)$$

式中 R_{sat} 为饱和反射系数, R_{unsat} 为非饱和反射系数, P_{sat} 为饱和功率, P 为脉冲的瞬时功率。参数选取为: R_{sat} 为30%, R_{unsat} 为60%, P_{sat} 为150 W。

数值计算时选取的光纤参数: γ 为 $0.003 \text{ W}^{-1}/\text{m}$;中心波长1035 nm;单模光纤的群速度色散为 $+0.023 \text{ ps}^2/\text{m}$,三阶色散较小可以忽略,其长度为变量;AS-Yb-PBGF的群速度色散为 $-0.075 \text{ ps}^2/\text{m}$,三阶色散为 $+0.002 \text{ ps}^3/\text{m}$,长度为0.4 m;增益饱和能量 E_{sat} 为100 pJ。

3 模拟结果及讨论

该激光器中, 当 AS-Yb-PBGF 取 0.4 m, 单模光纤从 0 逐步增加, 结果发现单模光纤在 0.4 ~ 1.4 m 可以得到稳定的孤子运转, 而当单模光纤超过 1.4 m 以后, 激光器进入非孤子运转状态, 脉冲宽度快速增加, 如图 2(a) 所示。从图 2(b) 可以看到腔内净色散接近零时, 脉冲出现明显的附加结构, 这是由于此时 AS-Yb-PBGF 引入的较大的三阶色散起了主要作用。所以, 为了得到最高的重复频率和最好的脉冲质量, 选择长度为 0.4 m 的单模光纤与长度为 0.4 m 的 AS-Yb-PBGF 结合构成在 1 μm 波段能够实现简单和紧凑型的全光纤孤子激光器, 重复频率为 200 MHz 左右。

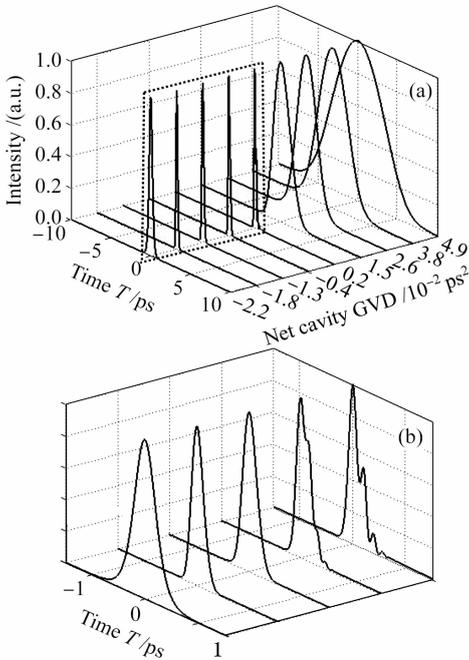


图 2 (a) 脉冲宽度随单模光纤长度变化的动力学过程;

(b) 是图 2(a) 中虚框部分的放大显示, 为孤子运转带

Fig. 2 (a) Dynamics of pulses duration with the change of the SMF; (b) Amplified display of the pulses in dashed frame in Fig. 2 (a), which are soliton operation

图 3 给出单模光纤为 0.4 m 时, 经过腔内多次循环得到稳定的孤子序列的动力学过程。稳态时输出孤子能量为 14 pJ, 脉冲宽度为 244 fs, 时间带宽乘积为 0.32, 接近傅里叶变换极限。

稳态孤子脉冲及其与高斯曲线和双曲正割曲线拟合的比较结果如图 4(a) 所示, 此时腔内净群速度色散为 -0.021 ps^2 , 其对应的频谱曲线如图 4(b) 所示。从图 4(a) 中对数坐标图像可以看出, 锁模孤子

脉冲的形状是双曲正割型, 这是基态孤子的标准形式。图 4(b) 的频谱曲线中出现的非对称性边带是由于 AS-Yb-PBGF 中存在不可忽略的三阶色散, 三阶色散引入的色散波与孤子波的共振相互作用形成了频谱的非对称边带结构^[20]。

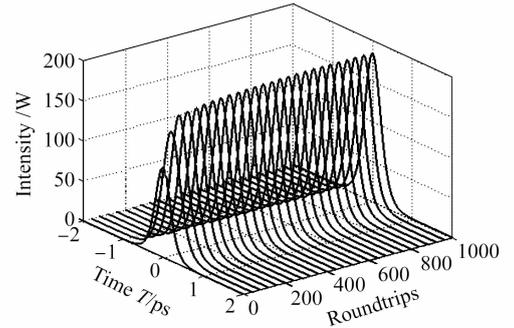


图 3 单孤子脉冲序列随循环次数的变化动力学过程

Fig. 3 Dynamics of single soliton pulse trains with roundtrips

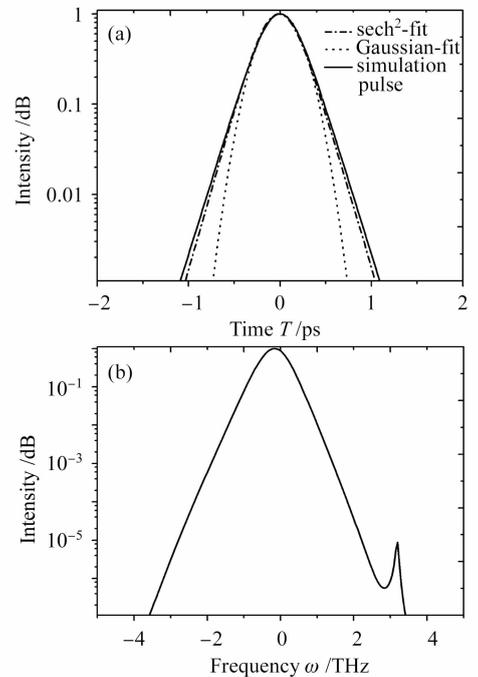


图 4 稳态单孤子脉冲的时域(a)和频域(b)特性

Fig. 4 Temporal (a) and spectral (b) characteristics of stable single soliton pulse

4 结论

采用 AS-Yb-PBGF 作增益介质并提供反常群速度色散, 设计了一种被动锁模全光纤环形孤子激光器。利用非线性薛定谔方程数值模拟该激光器的单孤子运转的动力学过程, 得出最佳运转参数: 当 AS-Yb-PBGF 固定为 0.4 m 时, 选择单模光纤等于

0.4 m,就可以实现脉冲宽度为244 fs,脉冲能量为14 pJ和时间带宽乘积为0.32,即接近傅里叶变换极限的单孤子运转。该激光器结构简单紧凑,重复频率较高,能够成为1 μm 波段的稳定的飞秒孤子源。

参 考 文 献

- 1 K. Tamura, J. Jacobson, E. P. Ippen *et al.*. Unidirectional ring resonators for self-starting passively mode-locked lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3):220~222
- 2 M. E. Fermann, M. J. Andrejco, M. L. Stock *et al.*. Passive mode locking in erbium fiber lasers with negative group delay [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(9):910~912
- 3 Jens Limpert, Fabian Röser, Thomas Schreiber *et al.*. High-power ultrafast fiber laser systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(2):233~244
- 4 Pan Yuzhai, Zhang Jun, Hu Guijun *et al.*. High-power ytterbium-doped fiber laser based on fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9):1237~1239
潘玉寨,张军,胡贵军等.利用光纤光栅的高功率掺镱光纤激光器[J].*光学学报*, 2004, **24**(9):1237~1239
- 5 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,张隰等.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
- 6 K. Tamura, H. A. Haus, E. P. Ippen. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fibre ring laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(24):2226~2228
- 7 Axel Ruehl, Holger Hundertmark, Dieter Wandt *et al.*. 0.7 W all-fiber erbium oscillator generating 64 fs wave breaking-free pulses [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16):6305~6309
- 8 H. Lim, F. Ö. Ilday, F. W. Wise. Generation of 2-nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(8):660~662
- 9 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19):1547~1549
- 10 Zhou Bing, Jiang Yongliang, Chen Xiaowei *et al.*. Numerical simulation on propagation of ultra-short laser pulse in photonic crystal fibers with different group velocity dispersion parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):323~328
周冰,姜永亮,陈晓伟等.超短激光脉冲在不同色散参量光子晶体光纤中传输的数值模拟[J].*光学学报*, 2007, **27**(2):323~328
- 11 Ren Guobin, Lou Shuqin, Wang Zhi *et al.*. Study on dispersion properties of photonic crystal fiber by equivalent-index model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):320~324
任国斌,娄淑琴,王智等.等效折射率模型研究光子晶体光纤的色散特性[J].*光学学报*, 2004, **24**(3):320~324
- 12 H. Lim, F. Ö. Ilday, F. W. Wise. Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(25):1497~1502
- 13 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):57~66
王清月,胡明列,柴路.光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J].*中国激光*, 2006, **33**(1):57~66
- 14 H. Lim, F. W. Wise. Control of dispersion in a femtosecond ytterbium laser by use of hollow-core photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10):2231~2235
- 15 A. Argyros, T. A. Birks, S. G. Leon-Saval *et al.*. Photonic bandgap with an index step of one percent [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1):309~314
- 16 C. K. Nielsen, K. G. Jespersen, S. R. Keiding. A 158 fs 5.3 nJ fiber-laser system at 1 μm using photonic bandgap fibers for dispersion control and pulse compression [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13):6063~6068
- 17 A. Isomäki, O. G. Okhotnikov. Femtosecond soliton mode-locked laser based on ytterbium-doped photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20):9238~9243
- 18 L. E. Nelson, D. J. Jones, K. Tamura *et al.*. Ultrashort-pulse fiber ring lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**(2):277~294
- 19 Thomas Schreiber, Bülend Ortac, Jens Limpert *et al.*. On the study of pulse evolution in ultra-short pulse mode-locked fiber lasers by numerical simulations [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13):8252~8262
- 20 Christian Spielmann, Peter F. Curley, Thomas Brabec *et al.*. Ultrabroadband femtosecond lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(4):1100~1114