

文章编号: 0258-7025(2008)10-1445-04

全负色散的单根全固型掺镱光子带隙 光纤飞秒孤子激光器

欧阳春梅 柴 路 胡明列 宋有建 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 设计了一种采用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 实现被动锁模的激光器, 该激光器中只有单根的全固型掺镱光子带隙光纤 (AS-Yb-PBGF)。在 $1 \mu\text{m}$ 波段, 该光纤具有负的群速度色散 (GVD), 因此腔内激光增益和负的 GVD 同时由该光纤提供。激光腔内非线性效应与仅由 AS-Yb-PBGF 提供的负 GVD 平衡作用可使激光器实现孤子运转。用分步傅里叶方法数值模拟了其孤子运转的动力学过程, 该系统中初始的噪声信号经过数百次循环就可以得到稳定的孤子运转。输出脉冲能量为 135 pJ, 脉冲宽度为 125 fs, 时间带宽乘积为 0.33, 接近傅里叶变换极限的脉冲, 脉冲重复频率可达 500 MHz。系统地研究了整个激光器中孤子脉冲演变动力学过程。

关键词 激光技术; 孤子光纤激光器; 全固型光子带隙光纤; 半导体可饱和吸收镜; 分步傅里叶方法

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1445

Femtosecond Soliton Laser with All-Negative Group Velocity Dispersion Based on Single All-Solid Ytterbium-Doped Photonic Bandgap Fiber

Ouyang Chunmei Chai Lu Hu Minglie Song Youjian 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 soliton laser is constructed employing semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) as mode-locking regime. This laser only has single all-solid Yb-doped photonic bandgap fiber (AS-Yb-PBGF). At $1 \mu\text{m}$ wavelength region, the fiber has anomalous group velocity dispersion (GVD), thus it provides the laser gain and anomalous dispersion simultaneously. In the cavity, the balanced effect between the nonlinear effect and the anomalous GVD offered by the AS-Yb-PBGF can lead to soliton operation. By means of the split-step Fourier method, the dynamics of single-soliton operation in the laser is numerically simulated. At different initial signals the same stable soliton operation is finally obtained. The single-soliton operation with the pulse duration of 125 fs, the pulse energy up to 135 pJ has been shown, and the time-bandwidth product is 0.33 nearly the transform-limited pulse. The pulse repetition rate is up to 500 MHz. At the same time, the dynamics process of the pulse in the cavity is systemically studied.

Key words laser technique; fiber soliton laser; all-solid photonic bandgap fiber; semiconductor saturable absorber mirror; split-step Fourier method

1 引 言

被动锁模光纤激光器由于结构简单、紧凑、高稳

定、低成本、能产生很窄的光脉冲等优点成为倍受关注的飞秒光源^[1,2]。然而,被动锁模光纤激光器产

收稿日期: 2007-12-14; 收到修改稿日期: 2008-03-27

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), 高等学校博士学科点专项科研基金 (20070056083, 20070056073) 和新世纪优秀人才支持计划资助项目。

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, 目前主要研究超短脉冲激光技术及其应用。

E-mail: lu_chai@tju.edu.cn

生的飞秒脉冲仅在1.5 μm 波段实现了广泛的应用,这是因为传统的单模光纤可以在这一波段为孤子的形成提供负的群速度色散(GVD)。对1 μm 波段来说,单模光纤只能提供正的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或棱镜对提供负的GVD^[3]。但是这种分离元件的使用使实现全光纤化激光器成为难题。近年来,随着光子晶体光纤(PCF)的出现^[4~7],使光纤激光器中孤子的形成范围从通信波段扩展到可见光波段。最近,一种集增益、负GVD和非线性于一体的全固型掺镱光子带隙光纤(AS-Yb-PBGF)问世^[8],使在1 μm 波段构造简单、紧凑、环境稳定性高的集成化飞秒光源成为可能。这种带隙光纤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,不会给孤子整形过程中引入过大的非线性而导致脉冲分裂。A. Isomäki等利用没有掺杂稀土离子的全固带隙光纤补偿色散,实现了全光纤的孤子锁模运转^[9]。另外,他们又将AS-Yb-PBGF作为增益介质和色散补偿元件在色散管理型激光器中实现了孤子运转^[8]。

为了简化激光腔结构,实现高重复频率被动锁模运转,本文设计并模拟计算了基于单根AS-Yb-PBGF并采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的激光器。没有加入任何提供正色散的光纤,仅仅采用单根增益带隙光纤构成了具有更高重复频率的飞秒脉冲孤子激光器。通过数值模拟该激光器的腔内GVD,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,证明了该激光器能够从噪声信号快速获得稳定的飞秒孤子脉冲。

2 激光器模型

被动锁模光纤孤子激光器如图1所示。图中腔内只有一根AS-Yb-PBGF,为孤子激光器运转提供负GVD,SPM效应,增益,增益饱和及增益色散。锁模机制采用SESAM锁模,实现自起动的稳定被动锁模飞秒孤子运转。

采用广义非线性薛定谔方程来描述在AS-Yb-PBGF中光脉冲的演化过程

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = -\frac{i}{2}(\beta_2 + i\gamma T_2^2) \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma |A|^2 A + \frac{1}{2}(g - \alpha)A, \quad (1)$$

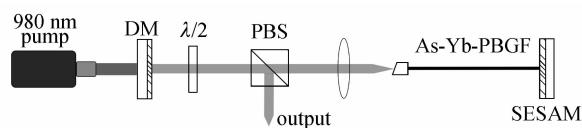


图1 基于AS-Yb-PBGF的光纤孤子激光器示意图。
DM: 双色镜(对抽运光高透,激光高反); PBS: 偏振分束棱镜

Fig.1 Schematics of soliton fiber laser based on AS-Yb-PBGF. DM: dichroic mirror (high transmission at pump light and high reflection at laser wavelength); PBS: polarization beam splitter

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GVD, 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,增益系数可以表示成

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

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。

SESAM 是一个将半导体可饱和吸收体与布拉格反射镜集成的器件,饱和吸收体的吸收率与腔内光强有关,强度越大,吸收率越低。当腔内噪声脉冲中心部分的强度经过增益放大后使吸收体饱和,这部分能量就能通过吸收体并被反射回腔内。然而脉冲边沿的能量低,不足以使吸收体饱和,则这部分能量被吸收,SESAM 就是这样对脉冲进行压缩整形的。

3 模拟结果及讨论

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 ; AS-Yb-PBGF 的GVD为 $-0.075 \text{ ps}^2/\text{m}$, TOD为 $+0.002 \text{ ps}^3/\text{m}$, 长度为 0.2 m ; 腔内净色散为 -0.03 ps^2 ; 增益饱和能量 E_{sat} 为 120 pJ ; 同时,采用调制深度为 30% 的SESAM。为了研究初始信号对脉冲演变的影响,模拟计算时分别选取功率为 5 W 和 20 W 的白噪声以及 60 W 的双曲正割单脉冲为初始信号,结果都得到了相同的稳定孤子运转。图2中给出的是 20 W 初始白噪声演变的孤子序列。从中可见该系统中噪声信号仅仅经过两百多次循环就得到了稳定的单孤子运转。

通过调整腔内的波片,可以改变偏振分束棱镜(PBS)的输出耦合系数。图3描述的是耦合输出为 30% 时得到的孤子脉冲时域特性,并给出其与高斯脉冲和双曲正割脉冲的拟合情况。可以看到,得到

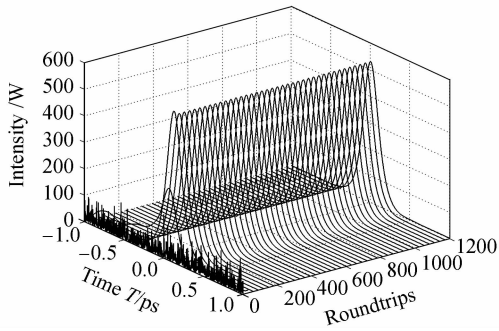


图2 单孤子脉冲序列随循环次数变化的动力学过程

Fig. 2 Dynamics of sing soliton pulse trains with roundtrips

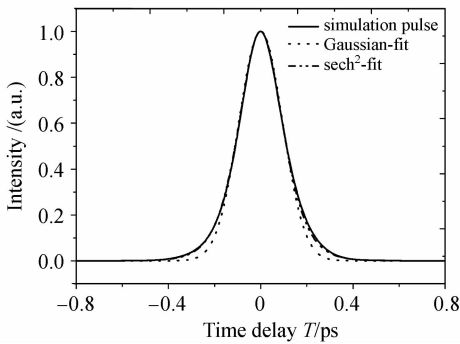


图3 稳态单孤子脉冲的时域特性

Fig. 3 Temporal characteristics of the stable single soliton pulse

的稳态孤子脉冲形状是双曲正割的。输出的脉冲能量为135 pJ,脉冲重复频率达到500 MHz,脉冲宽度为125 fs,时间带宽乘积为0.33,已经接近傅里叶变换极限的脉冲。

脉冲的频谱特性如图4所示。只在对数坐标下的频谱曲线中看到强度较弱的边带,这是因为本文所设计的激光器腔长很短,抑制了三倍于谱带半宽度范围内色散波的相位匹配^[10],边带不对称是由于

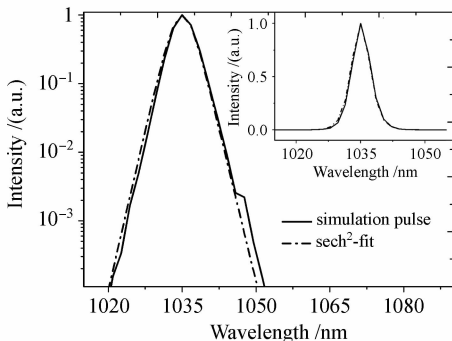


图4 稳态单孤子脉冲的频域特性,插图给出线性坐标下的频谱

Fig. 4 Spectral characteristics of stable single soliton pulse (insertion: spectra curve at linear coordinate)

AS-Yb-PBGF 中存在不可忽略的三阶色散,它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^[11]。

激光器腔内孤子脉冲的动态演变过程如图5所示。图中给出了脉冲在腔内不同位置的能量和脉冲宽度,可以看到,脉冲能量在腔内各处的变化较大,但脉冲宽度的最大变化量只有7 fs。是由于增益光纤中的负GVD,SPM效应,增益,损耗,增益色散和增益饱和效应以及SESAM的作用达到平衡的结果。而图1所示的输出位置也正是脉冲宽度最小的地方。

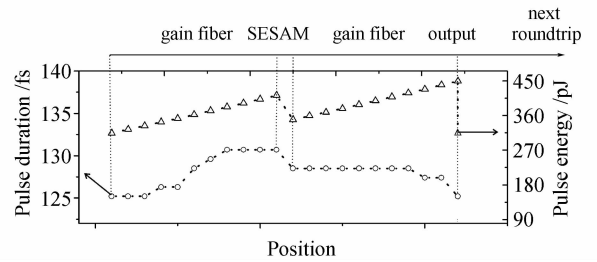


图5 腔内孤子脉冲的动力学演变过程

Fig. 5 Dynamics of intracavity soliton pulse

与一般的孤子激光器相同,孤子运转应该符合孤子面积理论。根据模拟中采用的色散和非线性系数,计算的孤子面积为 $E_s \tau_s = 2\beta_2/\gamma = 5 \times 10^{-23} \text{ Js}$ 。而由此得到的孤子脉冲能量和脉冲宽度计算的孤子面积 $E_s \tau_s \approx 5.6 \times 10^{-23} \text{ Js}$,也就是说本文所设计的孤子激光器能实现更高的脉冲能量,这可能是由于饱和吸收体的快速吸收时间常数对脉冲整形过程的影响造成的^[10]。

4 结 论

设计了一种采用SESAM被动锁模的飞秒孤子激光器,腔内只有一根AS-Yb-PBGF作增益介质并提供负GVD。利用非线性薛定谔方程数值模拟了该激光器的孤子运转动力学过程,在初始信号不同的情况下,同样得到了脉冲宽度为125 fs,脉冲能量为135 pJ和时间带宽乘积为0.33,接近傅里叶变换极限的单孤子运转。由于腔长较短,脉冲重复频率可达500 MHz。另外,研究了激光腔内脉冲的演化过程,得到脉冲输出的最佳位置。该激光器采用了集成化的增益带隙光纤,结构简单紧凑,重复频率高,能够成为1 μm波段稳定的飞秒孤子激光源。

参 考 文 献

- ring resonators for self-starting passively mode-locked lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3):220~222
- 2 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
- 3 H. Lim, F. Ö İlday, F. W. Wise. Generation of 2-nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(8):660~668
- 4 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
- 5 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):319~323
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):319~323
- 6 Kang Li, Yishan Wang, Wei Zhao *et al.*. Lasing characteristics of strongly pumped Yb-doped photonic crystal fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6):347~350
- 7 Li He, Bojun Yang, Xuepeng Song *et al.*. Actively mode-locked fiber ring laser based on photonic crystal fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6):342~344
- 8 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
- 9 A. Isomäki, O. G. Okhotnikov. All-fiber ytterbium soliton mode-locked laser with dispersion control by solid-core photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(10):4368~4373
- 10 Mathias Moenster, Peter Glas, Gunter Steinmeyer *et al.*. Femtosecond neodymium-doped microstructure fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(21):8671~8677
- 11 C. Spielmann, P. F. Curley, T. Brabec *et al.*. Ultrabroadband femtosecond lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(4):1100~1114

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。执笔人(第一作者)应是在激光及其相关领域具有一定造诣,对某一方面有较深入研究的专家、学者。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。投稿同时,请作者提供详细的作者简介(包括研究领域、主要研究成果等)。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

投稿方式:网上投稿:www.opticsjournal.net 或 E-mail:zhgig@mail.shnc.ac.cn

咨询电话:021-69918427