

改进的非线性放大环形镜锁模激光器研究

周晓康 宋有建 廖若宇 刘博文 胡明列 柴路 王清月

天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 报道了一种改进的非线性放大环形镜锁模激光器,即在传统的8字腔和 σ 腔中,通过加入非互易性元件的方式,有效缩短了光纤长度,降低了非线性积累量,从而提升锁模激光器的重复频率,并且可以改善激光器的自启动特性。传统的“8”字腔保偏光纤激光器必须借助半导体可饱和吸收镜、碳纳米管等真实可饱和吸收体才能锁模运转。本文只利用非互易性元件,在改进的“8”字腔全保偏(PM)掺铒光纤激光器中,实现了重复频率为22 MHz,平均功率为23.6 mW的孤子锁模单脉冲激光输出,直接输出脉宽为308 fs。传统的“8”字腔光纤激光器的重复频率限制在10 MHz水平。通过加入非互易性元件,本文在改进的“ σ ”腔非保偏掺铒光纤激光器中,在呼吸孤子锁模域获得了重复频率为80 MHz,平均功率为36 mW的单脉冲激光输出;在正色散域获得了重复频率为53.6 MHz,平均功率为14 mW的单脉冲激光输出。

关键词 激光器; 光纤激光器; 掺铒光纤; 被动锁模; 非线性放大环形镜; 自启动

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1202002

Research on Modified Nonlinear Amplifying Loop Mirror Mode-Locked Lasers

Zhou Xiaokang Song Youjian Liao Ruoyu Liu Bowen Hu Minglie
Chai Lu Wang Qingyue

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

Abstract A modified nonlinear amplifying loop mirror mode-locked laser is demonstrated. In this setup, nonreciprocal elements are included into traditional “figure eight” and “ σ -like” cavities in order to decrease the length of essential fiber required to accumulate nonlinear phase shift. As a result, the repetition rate of these lasers is significantly increased. In addition, the self-starting characteristic is also improved. The passive mode-locking operation of traditional “figure eight” polarization maintaining (PM) fiber lasers requires real saturable absorbers, such as semiconductor saturable absorber mirror, or carbon nanotube. In this work, by using nonreciprocal elements, passive mode locking in a modified “figure eight” polarization maintaining Er-fiber laser is realized. The laser works in soliton regime and generates 308 fs pulses with an average power of 23.6 mW at a repetition of 22 MHz. The repetition rate of traditional “figure eight” fiber lasers is limited to 10 MHz. By using nonreciprocal elements, a non PM Er-fiber laser based on a modified “ σ -like” cavity working at stretched pulse regime generates pulses with an average power of 36 mW at a repetition of 80 MHz. The same laser working at normal dispersion domain generates pulse train with an average power of 14 mW at a repetition of 53.6 MHz.

Key words lasers; fiber lasers; erbium-doped fibers; passive mode locking; nonlinear amplifying loop mirror; self-starting

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3500; 140.4050

收稿日期: 2015-06-23; 收到修改稿日期: 2015-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(61205131, 61227010, 61322502), 国家973计划(2011CB808101, 2010CB327604), 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT13033)

作者简介: 周晓康(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤飞秒激光器方面的研究。E-mail: zhouxk@tju.edu.cn

导师简介: 王清月(1938—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事飞秒激光技术方面的研究。E-mail: chywang@tju.edu.cn

1 引言

光纤激光器由于稳定性好、体积小和易集成等特点受到越来越多的关注。同时,随着对光纤激光器锁模动力学研究的不断深入,窄脉宽、宽光谱和高峰值功率的锁模光纤激光器在科学研究以及工业产业应用中也倍受青睐^[1-2]。

由于主动锁模器件不能支持亚皮秒超短脉冲产生并且会增加系统复杂程度,飞秒脉冲光纤激光器的锁模方式以被动锁模^[3]为主。传统的被动锁模方式有真实可饱和吸收体(SA),非线性偏振旋转(NPE),以及非线性环形镜^[4](NLM)等,但它们又被各自存在的问题所限制。目前主流的真实可饱和吸收体包括半导体可饱和吸收镜(SESAMs)^[5],碳纳米管(CNTs)^[6-7],石墨烯^[8-10]等。利用这类可饱和吸收体锁模的优点在于,直接将参数合适的可饱和吸收体置入光路便能实现锁模,并且还有透射式、反射式等多种形式的可饱和吸收体可以满足不同腔形需求。但是可饱和吸收体的损伤阈值一般较低,故其典型输出功率较低,限制了其广泛应用。非线性偏振旋转^[11]锁模作为目前最为常见的光纤锁模方式,相对于其他方式可以获得较好的输出性质。但是使用非线性偏振锁模的激光器在搭建以及维护上存在一些问题^[12]。首先,这种锁模方式依赖于光偏振态在光腔中演化,因此其状态依赖于温度、震动等外界环境的影响,并且其锁模机制决定了不能利用保偏光纤来消除这些外界影响。其次,当激光器因外界影响脱离锁模状态后,并没有一种可遵循的操作方式能够使得非线性偏振旋转激光器重复之前的锁模状态。由于以上两点,利用这一方式锁模的激光器也被其自身缺点所制约,难以实现大规模普及。非线性环形镜^[13]是一种利用光纤环路中两束沿相反方向传播的光在交汇处实现碰撞加成锁模的方式,但由于这一锁模方式极大地依赖于这两束光在环路中积累的非线性相移差,因此传统的非线性环形镜锁模激光器只能工作在非常低的重复频率下^[14],无法满足实验以及工业应用中对高重复频率激光器的需求。另外,传统非线性环形镜通常需要主动加入调制器^[15],或滤波片^[16],可饱和吸收体^[17]等辅助锁模元件的配合来实现稳定锁模,这无疑增加了成本以及结构的复杂性。

本文在传统非线性放大环形镜锁模的基础上加入了非互易性元件,在全保偏的“8”字腔结构与非保偏的“ σ ”腔结构下,均实现了高重复频率、稳定的被动锁模运转,并研究了腔内净色散对于锁模特性的影响。

2 基本原理

使用非线性放大环形镜锁模的激光器由于包含主次两个环路,其光腔形状如同阿拉伯数字“8”,故常被称作“8”字型激光器。若将次环取消,用线性的反射结构将光返回主环,便成为了“ σ ”型激光器。“ σ ”型激光器可以工作在更短的腔长下,相比于“8”字型激光器可以拥有更高的重复频率。在传统非线性放大环形镜锁模激光器中,由于Sagnac干涉环的效应,脉冲中心能量较强,是获得较多非线性相移的部分,拥有更大的透射率;而脉冲两翼能量较弱,是非线性相移累积相对较少的部分,被较多地反射。当脉冲循行至 2×2 光纤耦合器的交汇处时能量较强的部分透过,能量弱的部分被削弱,等效于可饱和吸收体的功能^[18]。但这一结构的缺陷在于,传统的非线性放大环形镜锁模结构中并无脉冲成形机制,也就是说初始状态下这一结构并不能提供可饱和吸收作用,因此激光器难以跳转进入锁模状态运行。并且,传统的光腔中需要很长的光纤来积累足够非线性相移实现锁模,从而限制了传统非线性放大环形镜锁模激光器的重复频率的提升。

本文建立了一种改进型非线性放大环形镜锁模激光器,除去传统的“8”字型、“ σ ”型激光器必需的光学元件外,光腔中还包含一种非互易性元件^[19]。非互易性表征的是当激光沿正反两个方向通过该元件时将积累不同的光学性质。Haensel等^[20]提出通过在光腔中加入非互易性元件的方式可以明显降低激光器对于非线性积累的需求,提升自启动特性,并给出了可能的非互易性元件结构。本文对其中所提供的几种光学非互易性元件进行了系统实验,并从中选取了实验效果较好且形式最为简洁的波片与法拉第旋光器的组合,具体实现方法为将法拉第旋光器置于两个四分之一波片之间。该非互易性元件组合可以使Sagnac干涉环沿相反两个方向通过的光积累不同的相移,从而在合束器的输出端产生特定的相位偏置,对应的光强透过率大于零,并且该相位偏置量可以通过旋转波片调整。

图1中实线代表的是传统非线性放大环形镜中透射率^[19]与所积累非线性相移关系的曲线。可以看到,当所积累非线性相移为零时,即脉冲形成的初始阶段,不仅透射率为零而且此时的曲线斜率亦为零,这意味

着此时无可饱和吸收作用,激光器很难摆脱这一状态实现锁模运转。然而当光腔中加入了非互易性元件后,光腔中出现了初始的相位偏置,此时的透射率与所积累非线性相移关系如图1中虚线所示。在所积累非线性相移接近零时的脉冲形成初始阶段,透射率与曲线斜率不为零,这意味着随着脉冲峰值功率的提升,非线性相移增大,透射率相应增大,从而实现可饱和吸收效应,有利于塑造脉冲形状,更容易实现稳定锁模运转^[20]。除此以外,非互易性元件引入的这一初始相位偏置可以减少达成锁模所需的非线性相移量,从而可以在更高的重复频率下实现锁模运转。

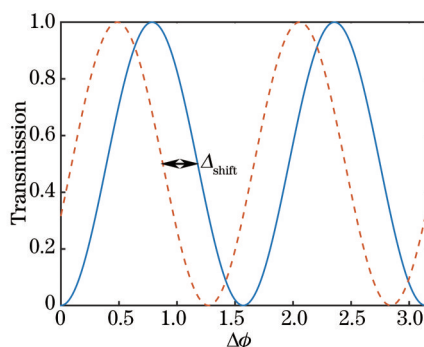


图1 透射率随非线性相移变化曲线

Fig.1 Transmission curves under different nonlinear phase shifts

3 实验装置

3.1 全保偏改进“8”字腔结构

改进型非线性放大环形镜锁模激光器采用全保偏光纤构成的改进的“8”字腔结构,其实验装置如图2所示。左侧环路为次环,其中的保偏隔离器(ISO)限制了激光只能在次环中单向循行。次环中还包括一支分束比为80:20的保偏光分束器,20%的一端作为耦合输出。右侧环路为主环,其中并无光传播方向限制器件,因此右侧环路中存在两束沿相反方向传播的光。在主环中加入了四分之一波片以及法拉第旋光器作为非互易性元件。使用保偏掺铒光纤(Nufern, PM-ESF-7/125)作为增益光纤,由最高输出600 mW的工作波长为976 nm保偏光纤耦合输出的半导体二极管作为抽运源。两支保偏准直器完成了空间光路部分与光纤部分的连接。在该结构下,分束比为50:50的2×2的保偏光纤耦合器(WDM)连接起了两侧环路。传统的“8”字腔激光器一般选用分束比有差异的光纤耦合器产生具有不同初始能量的相向传播的激光来引入非线性相移差异。本文中使用了50:50分束比的光纤耦合器证明了使用了非互易性元件,无需借助初始激光强度差异便可积累足够非线性相移,完成激光器的锁模。

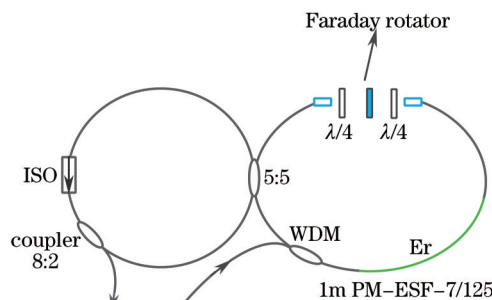


图2 全保偏改进“8”字腔实验装置图

Fig.2 Experimental setup of all polarization maintaining modified “figure eight” cavity

3.2 非保偏“σ”腔结构

由于全保偏装置中保偏熔接机熔接过程中对尾纤长度的限制,难以利用现有条件获得非常短的腔长,从而限制了全保偏改进“8”字腔结构锁模激光器重复频率的进一步提升。为了验证更高重复频率下的激光器锁模状态,搭建了一台加入了非互易性元件的非保偏“σ”腔结构激光器,实验装置如图3所示。与全保偏结构相比,2×2的分束器被换成了分束比为70:30的2×1光纤分束器以实现“σ”腔的腔形设计,有差异的分束

比保证了主环光纤长度较短的情况下依然可以积累足够的非线性相移。在2×1光纤分束器的合束端熔接了一支端面镀半透半反膜的光纤跳线,在完成腔形构建的同时,直接实现50%的耦合输出。这样的设计可以提高激光器的集成度。另外,在该激光器中使用正常色散的增益光纤(Liekki, Er80-4/125)提供增益的同时引入了正常色散,能够有效平衡普通单模光纤引入的反常色散。引入正常色散使得激光器运转在孤子锁模状态,可以在一定程度上展宽光谱,并有效地抑制孤子分裂,在更高的抽运功率下实现单脉冲运转。进一步增加腔内正色散量以致腔内净色散呈现近零色散甚至是正常色散时,将极大改变腔内动力学过程,实现具有不同光谱形状的锁模脉冲输出。

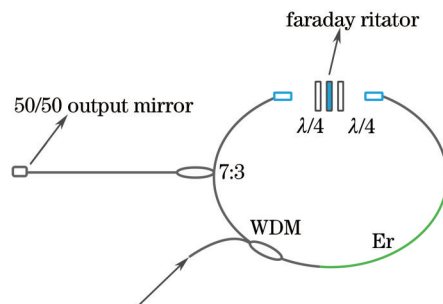


图3 非保偏改进“ σ ”腔实验装置图

Fig.3 Experimental setup of non-polarization maintaining modified “ σ -like” cavity

4 实验结果

4.1 全保偏“8”字腔结构

实验中通过旋转两个四分之一波片以及法拉第旋光器可以使得激光器达到锁模状态。锁模之后仍可通过旋转波片及法拉第旋光器的角度调谐光谱的中心波长及形状。在抽运功率为250 mW时,该激光器可以实现自启动锁模。通过旋转波片实现启动锁模后,将波片位置固定,其后每次开机都能实现自启动。由于使用了全保偏光纤搭建光腔,该自启动特性不受外界环境影响,这一点与非线性偏振旋转锁模激光器有着本质上的不同。在将抽运功率增加到最大600 mW的情况下,获得了23.6 mW的激光输出,图4(a)所示为利用采样带宽为1 GHz的数字示波器(Agilent infiniium 1GHz 4GSa/s)测得的脉冲序列,激光器运转在单脉冲状态。随后对锁模脉冲序列进行频谱分析,利用射频频谱分析仪(Agilent 8560EC)测量得到脉冲序列的1次谐波的频谱如图4(b)所示,信噪比为80 dB。同样条件下10次谐波的频谱如图4(c)所示,20次谐波的频谱如图4(d)所示,锁模脉冲信号依然有大于50 dB的信噪比,由此可知激光器的锁模状态十分稳定。锁模激光器重复频率为22.6 MHz,远高于传统“8”字腔激光器的典型重复频率,此时对应的激光器总的光纤长度约为8.2 m。利用自相关器(APE-pulseCheck-50 ps)测量的直接输出脉冲的自相关曲线如图5所示,考虑双曲正割的孤子脉冲形状,其脉冲的半峰全宽为308 fs。从插图(15ps窗口下)中的自相关曲线中也可以看出主脉冲附近无子脉冲。由光谱仪(YOKOGAWA AQ6370B)测量的全保偏“8”字腔实验装置的锁模光谱如图6所示,中心波长为1566 nm,光谱的半峰全宽为7 nm。由于腔内所有元件均为负色散,光谱上有明显的Kelly边带^[21],呈现为典型的孤子锁模状态。

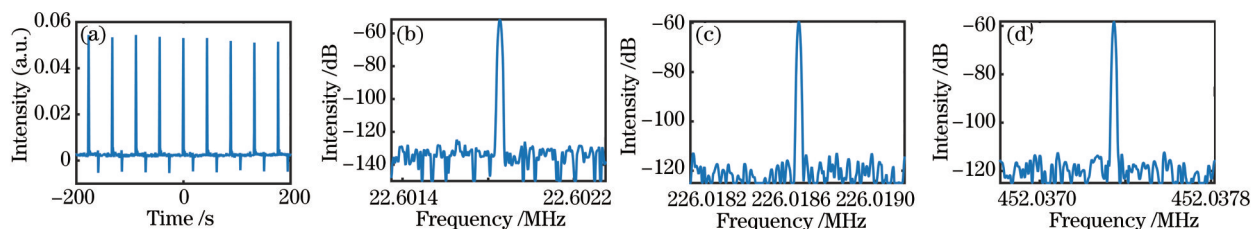


图4 全保偏改进“8”字腔锁模特性。(a) 锁模脉冲序列;(b) 1次谐波频谱;(c) 10次谐波频谱;(d) 20次谐波频谱

Fig.4 Mode-locking characteristics of all polarization maintaining modified “figure eight” cavity. (a) Mode-locked pulses train; (b) radio frequency spectrum of fundamental harmonic of pulse train; (c) radio frequency spectrum of 10 th harmonic of pulse train; (d) radio frequency spectrum of 20 th harmonic of pulse train

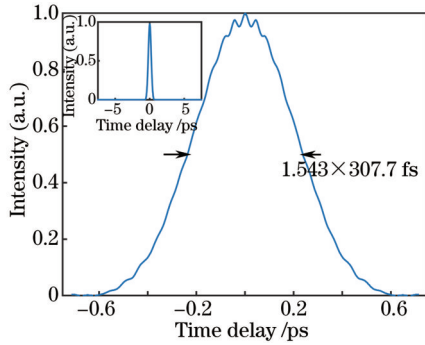


图5 全保偏改进“8”字腔输出的脉冲自相关曲线(1.5 ps窗口),插图中亦为此自相关曲线(15 ps窗口)

Fig.5 Autocorrelation trace of output pulses from all polarization maintaining modified “figure eight” cavity (1.5 ps window), the inset shows the same trace (15 ps window)

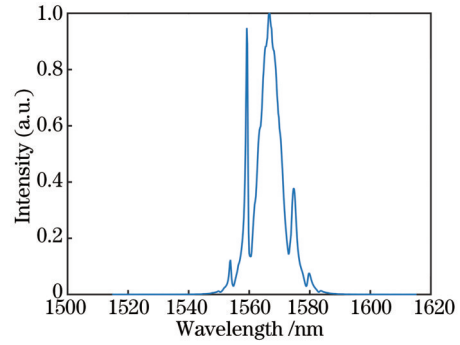


图6 全保偏改进“8”字腔输出激光光谱

Fig.6 Output laser spectrum of all polarization maintaining modified “figure eight” cavity

4.2 非保偏“σ”腔结构

在非保偏“σ”腔实验装置中,由于“σ”腔的结构设计使得总腔长较短,腔内普通单模光纤所提供总负色散量也较小。引入80 cm长的正常色散掺铒增益光纤,使得激光器工作在孤子锁模域,即腔内净色散量接近为零。在抽运功率为600 mW时,输出的平均功率为36 mW。激光器锁模获得了中心波长为1564 nm,半峰全宽为30 nm的输出光谱,如图7所示。图8所示为该状态下的自相关曲线,考虑高斯脉冲形状,其脉冲的半峰全宽为590 fs。这一光腔结构的总光纤长度为2 m,工作时的重复频率为80 MHz,能在高重复频率下获得锁模输出说明了非互易性元件的加入可以极大缩短用于积累非线性相移所需的光纤长度。

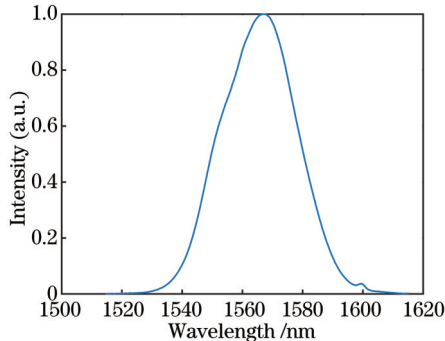


图7 近零色散域非保偏改进“σ”腔输出激光光谱

Fig.7 Output laser spectrum of non polarization maintaining modified “σ-like” cavity with near zero dispersion

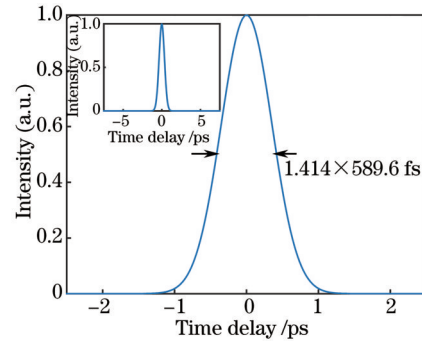


图8 非保偏近零色散改进“8”字腔输出的脉冲自相关曲线

Fig.8 Autocorrelation trace of output pulses from non polarization maintaining near zero dispersion improved “figure eight” cavity

其后又在该腔形基础上将正常色散掺铒增益光纤长度增加至2 m,使得腔内呈现净正常色散。获得了如图9所示锁模光谱,中心波长为1576 nm,光谱的半峰全宽为40 nm。此时的激光器的总光纤长度为3.2 m,重复频率为53.6 MHz。在最大抽运功率为600 mW时,获得了平均功率为14 mW的激光输出。其直接输出的脉冲的自相关曲线如图10所示。考虑高斯脉冲形状,其脉冲的半峰全宽为314 fs。输出功率及效率的下降是由于增益光纤长度过长,在增益光纤远离抽运一端抽运光较弱不能提供足够粒子数反转形成增益,相反会对激光有一部分吸收,使得整体增益有所下降。

5 结 论

实验研究了加入非互易性元件后的非线性放大环形镜锁模激光器的锁模输出特性。利用这种结构在全保偏改进“8”字腔中实现了22.6 MHz重复频率下的孤子锁模激光输出,输出平均功率为23.6 mW,直接输出脉宽为308 fs。这一结果弥补了非线性偏振旋转锁模机制无法应用于全保偏结构的缺憾,使利用简单易得的元件在全保偏结构中实现稳定锁模成为了可能。在非保偏“σ”腔结构中进一步缩短腔长,在更高重复

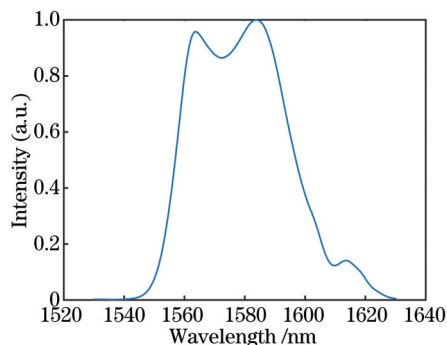


图9 正色散域非保偏改进“ σ ”腔输出激光光谱

Fig.9 Output laser spectrum of non polarization maintaining modified “ σ -like” cavity with normal dispersion

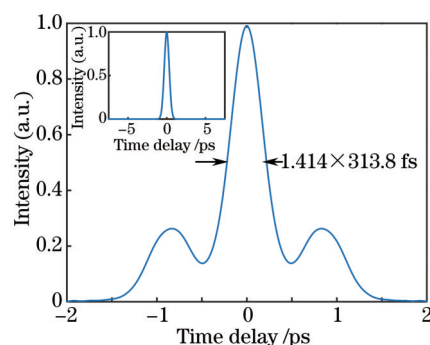


图10 非保偏正色散改进“8”字腔输出的脉冲自相关曲线 (4 ps 窗口), 插图中亦为此自相关曲线(15 ps 窗口)

Fig.10 Autocorrelation trace of output pulses from non-polarization maintaining normal dispersion modified “figure eight” cavity (4 ps window), the inset shows the same trace (15 ps window)

频率下获得了锁模激光脉冲输出,在呼吸孤子锁模域得到了重复频率为 80 MHz,平均功率为 36 mW 的激光输出;在正常色散域获得了重复频率为 53.6 MHz,平均功率为 14 mW 的激光输出。上述实验结果证明了加入非互易性元件后的非线性环形镜锁模的普适性。尤其是,这种激光器结构简单,并且能够稳定工作在较高重复频率下,可以作为各种实验研究与工业应用的超短脉冲光纤激光光源。

参 考 文 献

- 1 Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature photonics, 2008, 2(4): 219–225.
- 2 Mamalis N. Femtosecond laser: the future of cataract surgery[J]. Journal of Cataract & Refractive Surgery, 2011, 37(7): 1177–1178.
- 3 Huang Zhijian, Sun Junqiang. Self-starting mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(8): 961–966.
黄志坚, 孙军强. 自启动被动锁模掺铒光纤激光器的研究[J]. 光学学报, 1998, 18(8): 961–966.
- 4 Huang Zhijian, Sun Junqiang. Study on nonlinear amplifying compound loop mirror and passively mode locked erbium doped fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 1998, 25(9): 774–780.
黄志坚, 孙军强. 非线性放大复合环形镜及被动锁模掺铒光纤激光器的研究[J]. 中国激光, 1998, 25(9): 774–780.
- 5 Okhotnikov O, Grudinin A, Pessa M. Ultra-fast fibre laser systems based on SESAM technology: new horizons and applications[J]. New Journal of Physics, 2004, 6(1): 177.
- 6 Yamashita S, Set S Y, Goh C S, *et al.*. Ultrafast saturable absorbers based on carbon nanotubes and their applications to passively mode-locked fiber lasers[J]. Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics), 2007, 90(2): 17–24.
- 7 Song Qiuyan, Chen Genxiang, Tan Xiaolin, *et al.*. Multi-wavelength passively mode-locked laser based on single-walled carbon nanotube [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102002.
宋秋艳, 陈根祥, 谭晓琳, 等. 基于单壁碳纳米管的多波长被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102002.
- 8 Huang Wenyu, Feng Dejun, Jiang Shouzhen, *et al.*. Erbium-doped fiber laser based on single-layer graphene saturable absorber [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202001.
黄文育, 冯德军, 姜守振, 等. 基于单层石墨烯可饱和吸收的掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202001
- 9 Zhang H, Tang D Y, Zhao L M, *et al.*. Compact graphene mode-locked wavelength-tunable erbium-doped fiber lasers: from all anomalous dispersion to all normal dispersion[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(8): 591–596.
- 10 Ren Jun, Wu Sida, Cheng Zhaochen, *et al.*. Mode-locked femtosecond erbium-doped fiber laser based on graphene oxide versus semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602013.
任 军, 吴思达, 程昭晨, 等. 基于氧化石墨烯与半导体可饱和吸收镜的锁模飞秒掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602013.
- 11 Matsas, V J, Richardson D J, Newson T P, *et al.*. Characterization of a self-starting, passively mode-locked fiber ring laser that exploits nonlinear polarization evolution[J]. Optics Letters, 1993, 18(5): 358–360.
- 12 Li Chao, Zhao Lei, Huang Zhihua, *et al.*. Simulation study on amplitude stability in nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202007.
李 超, 赵 磊, 黄志华, 等. 非线性偏振旋转锁模光纤激光器幅值稳定性模拟研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202007.

- 13 Doran N J, Wood D. Nonlinear-optical loop mirror[J]. Optics Letters, 1988, 13(1): 56-58.
- 14 Ma Haiquan, Liu Chang, Zhao Wei, *et al.*. Figure-of-eight cavity Yb³⁺-doped fiber mode-locked lasers[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1173-1177.
马海全, 刘 畅, 赵 卫, 等. 8字形腔锁模掺Yb³⁺光纤激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1173-1177.
- 15 Nicholson J W, Andrejco M. A polarization maintaining, dispersion managed, femtosecond figure-eight fiber laser[J]. Optics Express, 2006, 14(18): 8160-8167.
- 16 Aguergaray C, Broderick N G R, Erkintalo M, *et al.*. Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser using a nonlinear amplifying loop mirror[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10545-10551.
- 17 Xu B, Martinez A, Set S Y, *et al.*. Polarization maintaining, nanotube-based mode-locked lasing from figure of eight fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(2): 180-182.
- 18 Tan Bin, Li Zhiyong, Li Shichen. Study of pulse transmission properties in nonlinear optical loop mirror[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(9): 3071-3076.
谈 斌, 李智勇, 李世忱. 非线性光纤环形镜的脉冲透过特性研究[J]. 物理学报, 2004, 53(9): 3071-3076.
- 19 Yariv, Amnon. Operator algebra for propagation problems involving phase conjugation and nonreciprocal elements[J]. Applied Optics, 1987, 26(21): 4538-4540.
- 20 Haensel W, Holzwarth R, Döbke R, *et al.*. Laser with Non-Linear Optical Loop Mirror[P]. US Patent: 8 873 601, [2014-10-28].
- 21 Pandit N, Noske D U, Kelly S M J, *et al.*. Characteristic instability of fibre loop soliton lasers[J]. Electronics Letters, 1992, 28(5): 455-457.

栏目编辑: 宋梅梅