

文章编号 1004-924X(2013)12-2994-07

非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器 自动锁模电路

易 波, 贾 文, 徐 军*, 陈国梁, 梅 理
(中国科学技术大学 物理学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:针对基于非线性偏振旋转(NPR)原理的被动锁模光纤激光器稳定性差和不能自行进入锁模状态的问题,本文设计了自动锁模电路,用于对激光器进行实时调控以获得稳定的锁模输出。该项设计利用高速光电探测器(PD)将 NPR 被动锁模光纤激光器输出的光信号转化为电脉冲信号,经过线性放大、整形处理后输出至单片机进行计数;单片机根据快速锁模判定算法判断该激光器的输出状态,并自动反馈调节加装在光纤激光器上的电控偏振控制器(PC),从而实现激光器的锁模稳定状态输出。实验结果表明,对于重复频率为 6.238 MHz 的 NPR 被动锁模激光器,自动锁模电路能够在 6 ms 内检测到失锁状态,在最长 10.24 s 内自动搜索达到稳定锁模工作状态。对于重复频率在 16 MHz 以下的 NPR 被动锁模激光器,自动锁模电路都能够快速实现自行启动或将启动后因故失锁的状态调节回锁模状态,达到预先的设计要求,具有结构简单、成本低、功耗低及性能稳定等优点。

关键词:光纤激光器;被动锁模;电控偏振控制器;自动锁模电路;非线性偏振旋转

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.2994

Automatic mode-lock circuit used in NPR passive mode-locked fiber laser

YI Bo, JIA Wen, XU Jun*, CHEN Guo-liang, MEI Li

(School of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

* Corresponding author, E-mail: xujun@ustc.edu.cn

Abstract: As passively mode-locked fiber lasers based on Nonlinear Polarization Rotation(NPR) have the problem of low stability and difficulty to self-start into a mode-locking state during operation, an online automatic mode-lock circuit was designed to adjust the laser in real time to get a stable mode-locked output. In the design, the signal from NPR passively mode-locked laser was transformed to an electrical pulse signal with a high speed photoelectric detector, and it was amplified and shaped linearly to be received by the Micro Computer Unit(MCU) to count. Then the MCU distinguished the state of the laser based on quick mode-lock judge algorithm and adjusted the electric controlled polarization controller (PC) on the fiber laser automatically. The experiment results show that for the NPR mode-locked fiber laser with a repetition rate of 6.238 MHz, the automatic mode-lock circuit can distinguish the losing lock in 6 ms, and can find and get into the mode-lock state in 10.24 s automatically. For

收稿日期:2013-04-19;修订日期:2013-06-08.

基金项目:安徽省教育厅人才基金资助项目(No. BJ2030020018);中国科学技术大学 2012 年青年创新基金资助项目(No. WK 2030380003)

NPR passive mode-locked fiber lasers with repetition rate lower than 16 MHz, this automatic mode-lock circuit can get into a stable mode-locked state quickly or restart immediately if the mode-lock state is lost for some reasons, which reaches the design requirements and shows advantages of simple structures, low costs, low powers, and high reliability.

Key words: fiber laser; passive mode locking; electronic polarization controller; automatic mode-lock circuit; Nonlinear Polarization Rotation(NPR)

1 引 言

被动锁模光纤激光器具有体积小、轻便,可以输出高峰值功率超短脉冲的优点,因此它在科学研究和工业生产中发挥的作用越来越大,同时也在光通信、微加工、太赫兹波等众多领域有着很大的应用潜力。1992年, V. J. Matsas 等首次实现了基于非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)的被动锁模光纤激光器^[1], 随后此类光纤激光器成为了研究热点^[2-10]。1993年 K. Tamura 利用 stretched-pulse 技术实现了 1.55 μm 波段 77 fs 脉宽的脉冲输出^[11]。2008年 X. Y. ZHOU 等利用基于 NPR 被动锁模机理的掺铽光纤激光器直接输出 28 fs 脉冲^[12], 这是目前锁模激光器实现的最窄脉冲。

但是通过实验研究,人们发现此类激光器不能自行进入稳定的锁模状态的概率很大,即在达到泵浦功率时多工作在连续光状态下而无脉冲输出。通常情况下不仅需要引入一个外界微小扰动来启动锁模状态,还要通过仔细调节偏振控制器找到最佳的工作状态,甚至会由于谐波锁模,锁模脉冲的重复频率在很大范围内变化而无法控制^[13]。该锁模方式与腔内偏振态密切相关,因此需要通过人工仔细调节偏振控制器来找寻最佳的工作状态。此外,处于正常锁模工作状态的激光器很容易受到外界振动、温度变化等扰动而丢失锁模状态,这些都极大地限制了 NPR 被动锁模光纤激光器的实际应用。为了解决这个问题,本文设计并实现了在线的自动锁模电路,使用光电探测器(Photodiode, PD)将激光器输出的激光信号转换为电信号,经信号处理放大和比较后,通过单片机实时检测和自动反馈调节电控偏振控制器(Polarization Controller, PC)。实验结果表明,该方法可以使激光器自行锁模并进入最佳工作状态,输出稳定的锁模脉冲,提高 NPR 被动锁模激光器的稳定性。

2 实验装置及工作原理

图 1 为 NPR 被动锁模激光器的自动锁模电路系统。激光器腔内使用一个带有光纤尾纤的起偏器对信号起偏和检偏,一个偏振无关隔离器保证激光单向运转,两个偏振控制器控制偏振态,工作介质为 Coractive 公司的高掺铽光纤。泵浦光源采用的是 980 nm 半导体激光器,通过波分复用器泵浦掺铽光纤和 10:90 光纤耦合器 10% 端输出,腔内其它光纤均为器件尾纤的 1060 nm 普通单模光纤。

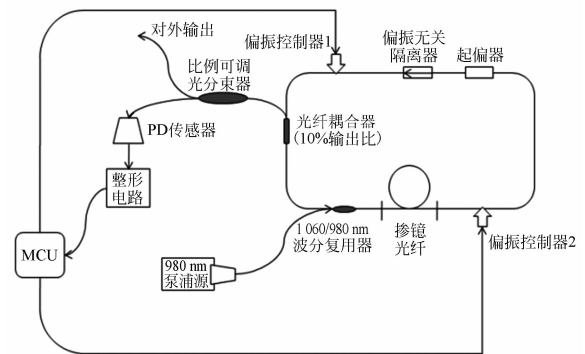


图 1 被动锁模激光器自动锁模电路系统

Fig. 1 Automatic mode-lock circuit system of passively mode-locked laser

NPR 被动锁模激光器利用光脉冲传输时的非线性双折射效应、自相位调制(Self Phase Modulation, SPM)和交叉相位调制(Cross Phase Modulation, XPM)效应使偏振态随光强度变化,再结合腔内偏振选择器件实现脉冲的窄化,从而实现被动锁模。其主要锁模器件为隔离器和起偏器。光脉冲在光纤中传输时由于光纤双折射和 SPM 与 XPM 效应,各点上的偏振态都将发生变化和旋转,其变化的方式和旋转的角度与脉冲各时刻点的光强相关;因此在脉冲到达隔离器和起偏器之前,脉冲中心和其它位置的偏振态有很大

差别。此时调节偏振控制器使在脉冲中心部分的偏振态与起偏器的偏振方式一致,最终使得偏振无关隔离器能阻挡低强度的脉冲边缘而使高强度的中心部分通过。于是激光在腔内的往返可以产生周期性的微小的窄化效果,最终实现锁模。

自动锁模电路系统的工作原理为:激光器输出的激光经可调比例分束器取样成合适的光强,然后经光电探测器转换为电信号交由自动锁模电路处理,锁模电路自动识别激光器是否进入锁模状态,并以此自动反馈控制偏振控制器 PC。通过调节 PC 改变施加在光纤上的挤压力,使得光纤发生形变产生双折射效应,从而改变偏振态方向,直至锁模成功。本文将获得一个均匀分布的等峰高窄脉冲锁模激光序列,具体到某台激光器的重复频率是一定的,实验中激光器的重复频率为 6.238 MHz。

3 电路基本结构

自动锁模电路系统主要分为光电探测器模块,信号整形模块,控制模块和电源模块(见图 2)。

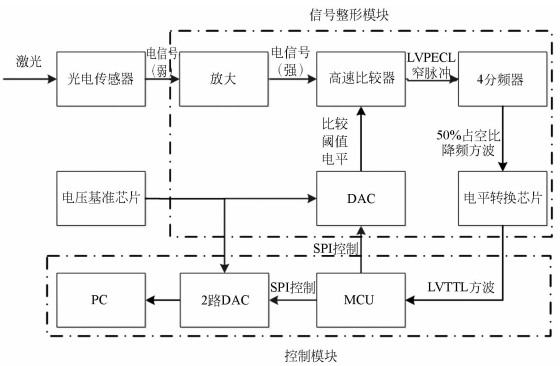


图 2 自动锁模电路结构示意图

Fig. 2 Framework of automatic mode-locked circuit

3.1 光电探测器模块

要将激光器产生的光信号转化为可被电路识别的电信号,需要将激光信号导入光电探测器。由于激光器产生的窄脉冲瞬间功率很高,为避免光电探测器过载烧毁,在接入探测器前须将激光信号通过一个衰减器。光电探测器采用 Agere Systems 公司生产的 R2860E Digital Receiver,通常应用在 10 Gb/s 级别的光纤数据传输中,上升沿响应小于 1 ns。对于脉宽仅数十皮秒的激光锁

模脉冲,在调节衰减比例之后,得到的电脉冲信号的脉宽小于 2 ns,典型峰高 40 mV 左右(见图 3)。电脉冲的重复频率与激光器的光脉冲重复频率一致。

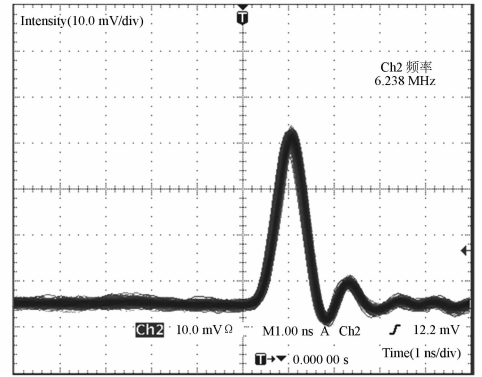
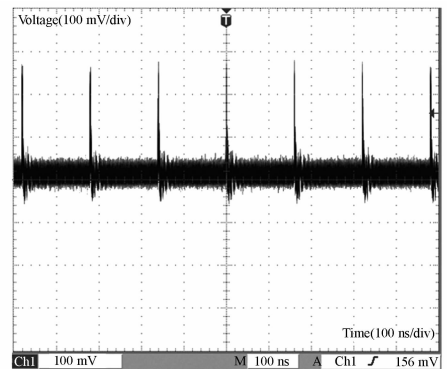


图 3 探测器识别的锁模脉冲电信号

Fig. 3 Mode-locked pulse signal identified by detector

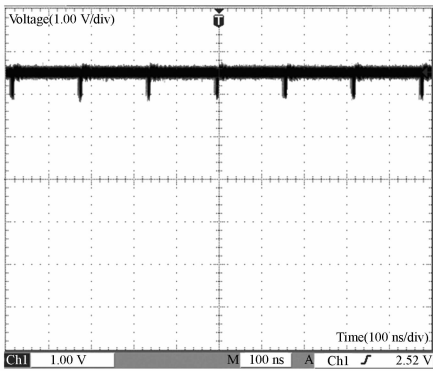
3.2 信号整形模块

探测器输出的微弱的高速窄脉冲信号需要处理成 LVTTTL 低压逻辑电平,以方便后续处理。为此本文首先采用了高速放大器 MAX2650,该放大器可在 900 MHz 带宽时达到 18 dB 的增益,如图 4(a)所示。然后信号交流耦合进入高速比较器。比较器选用的是 MAX9601,该比较器可输出摆幅仅为 0.8 V 的 LVPECL 电平,实现高达 4 GHz 的翻转频率,所需的比较阈值由控制模块提供。这样信号会被整形为 LVPECL 的互补输出窄脉冲,如图 4(b)所示,脉冲宽度约为 2 ns。由于控制模块不能直接处理这样的窄脉冲,因此使用 4 分频器 MC100EP33 将窄脉冲转换为 50%



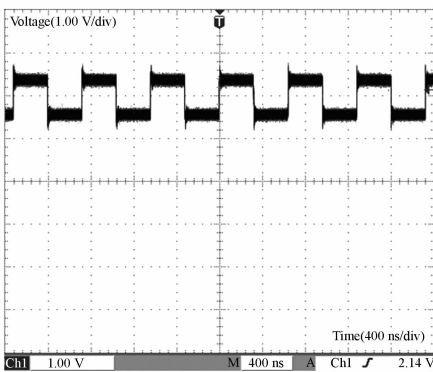
(a) 锁模脉冲放大后波形

(a) Mode-locked pulse waveform after amplification



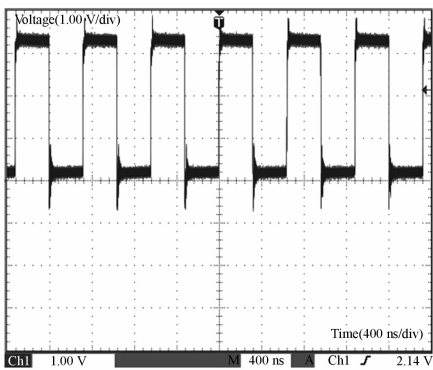
(b) 比较器输出的波形(反相端)

(b) Output waveform from comparator (inverting terminal)



(c) 4 分频器输出的波形

(c) Output waveform from 4 divider



(d) 电平转换芯片输出的波形

(d) Output waveform from level conversion chip

图 4 信号整形模块各级整形后的波形

Fig. 4 Waveforms at all levels of wave shaping modules

占空比的方波(见图 4(c)),此时脉宽为 320 ns;再使用电平转换芯片 MC100EPT22 转换为 3.3 V 标准的 LVTTTL 电平(见图 4(d))。这里应用的 MC100 系列芯片均有 4 GHz 以上的响应,使

得转化后的波形上升沿很稳定。

3.3 控制模块

控制模块负责处理信号整形模块得到的波形,提供比较器所需的阈值电平,并且控制偏振控制器的工作,因此选取接口丰富的单片机 MSP430F149 作为控制核心。这款单片机有 2 个 16 位定时器,适合对信号整形模块得到的方波进行高速计数,可以捕捉到脉宽 50 ns 以上的脉冲,最大外部时钟高达 8 MHz;并自带 2 路 USART 串口,可以在实验时同时经由串口输出计数值,方便在上位机实时观察电路工作情况。众多的 P 口可以模拟成 SPI 接口,用以控制 12 位 DAC 芯片 TLV5616 提供给比较器合适的比较阈值电平,同时控制双路 DAC TLV5617 经高压运放放大后输出可调电压给偏振控制器。DAC 通过调节电压增减可以对偏振控制器上的应力进行相应的调节,从而对激光器的状态进行微调,改变扰动量使其进入锁模状态。

4 锁模判定算法

鉴于激光器锁模的临界状态的复杂性,本文需要设置相应的判别策略。如图 5 所示,通常锁模良好时放大后的电信号为重复频率稳定的等高等间距窄脉冲(占空比 $<1\%$),而完全没有锁住时为连续光信号,即只有直流信号。在两种极端状态间,主要有 2 种临界状态:(1)倍频状态,即整数倍重复频率的脉冲;(2)脉冲重复频率正常,但是各脉冲的峰值大小并不一致,即状态不佳的输出状态。倍频状态的识别较为容易,因此本文主要针对不等高锁模状态设计判别策略。

本文采用设置不同的阈值比较电平对输入的波形进行 2 次判别计数。首先将比较器的阈值设置在信号放大后的脉冲峰值的 50%处,定时 5 ms 计数,称之为低计数。如果低计数的计数值 \approx 频率(6.238 MHz) \times 时间(5 ms)/分频值(4) $=$ 7 797.5,说明已经进入了锁模状态。低计数合格虽时不能判定各峰之间的一致性,但是可以排除完全没有锁住的状态和倍频状态。接着将比较器的阈值设置在脉冲峰值的 80%处,再进行一次 5 ms 计数得到另一个计数值,称为高计数。高计数偏离低计数的值越大,说明此时的峰高一致性越差,如图 5 所示。

考虑到脉冲的平均峰高是在一定范围内变化的,再综合效率和精确度的需求,设置第一次和第二次判断阈值分别为峰值的 50%和 80%。如需更加精确定量地测定锁模脉冲的峰高,可以设置多个阈值进行比较计数。比如在低计数合格后将阈值电平逐次上调,步进 5 mV,直至测量计数为 0。考察这个测量序列从 7 797 到 0 的变化过程,良好的锁模状态将表现为快速的突变,而峰高一致性不好的临界状态必然表现为渐变,但这种方法的耗时很久。实验结果表明,使用 2 次不同阈值电平比较判别计数的方法,既可以快速找到锁模状态,又能够有效地保证找到锁模状态时各脉冲高度具有一致性,可以正确判别 NPR 被动锁模光纤激光器的临界锁模状态。

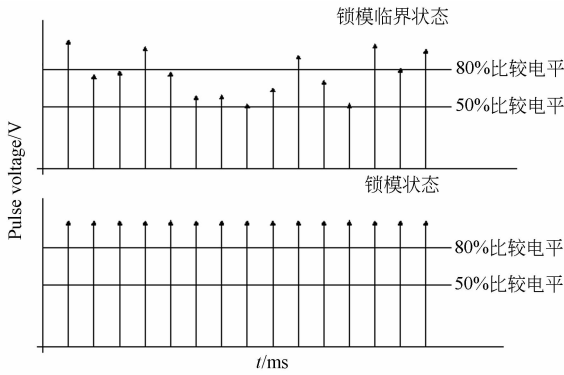


图 5 锁模状态判定算法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of algorithm for mode-locked state decision

5 实验结果

本文将激光器环路接好后固定在牢固可靠的铝质底板上,尽量消除振动和温度对实验的影响。调节泵浦功率和衰减器的比例,使得激光器输出的平均功率约为 10 mW。此时自动锁模电路开始工作,调节电控偏振控制器上的电压,在每次电压步进之后对激光器输出的脉冲进行处理。

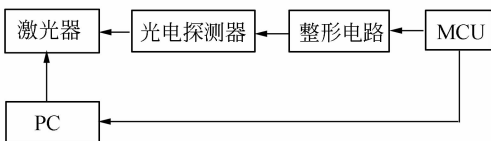
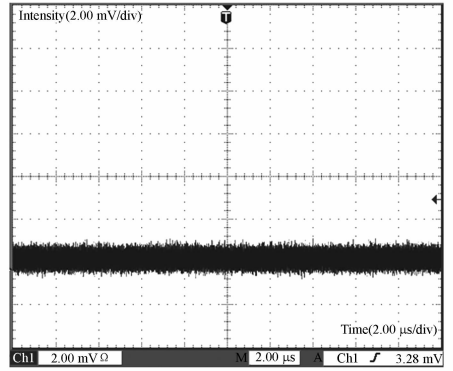


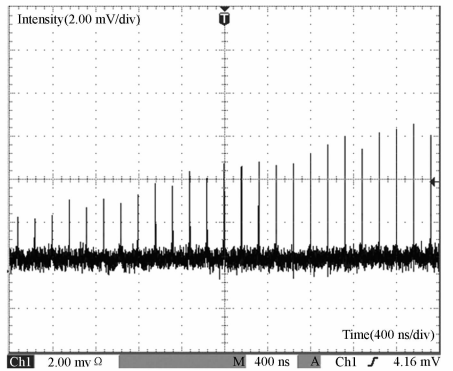
图 6 反馈控制环路

Fig. 6 Feedback control loop



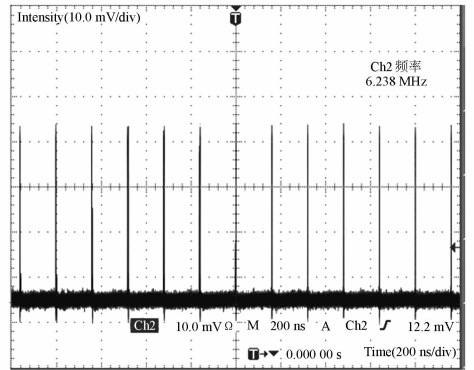
(a)完全失锁的连续光状态

(a)Completely loss locked state of continuous light



(b)临界锁模状态

(b)Critical mode-locked state



(c)经过自动锁模电路调节后的良好锁模状态

(c)Good mode-locked state after adjustment by automatic mode-locked circuit

图 7 激光器输出结果

Fig. 7 Results of laser output

如判断电路已进入锁模状态,则固定住提供给偏振控制器的电压值,并继续计数;一旦计数判断为失锁,立刻继续调节偏振控制器的电压,直至锁住

为止,如图 6 所示。2 路偏振控制器可以在光纤不同的轴方向上加以扰动,使锁模启动成功的概率更大。在锁模成功后人工加机械振动,电路能够实现失锁状态的快速发现。

由于控制偏振控制器为 10 位双路 DAC,实际上可以实现 $2^{10} \times 2^{10} = 1\ 048\ 576$ 个压力组合状态,而如果遍历这些状态来寻找锁模状态将耗时很久。在实验中发现,在压力相近时偏振控制器的很多状态是简并的,因此电压变化步进可以设置得较大,在能够找到锁模状态的同时大大地减少耗时。实验结果表明,在步进设置为 32 个 LSB (Least Significant Bit),单路 32 个状态时,每个状态 2 次计数耗时 10 ms,遍历 32^2 个状态最多耗时 10.24 s。由于锁住之后电路仍然在不停地对激光器输出的信号进行计数判断,在略长于 1 个计数周期(5 ms)的时间内即可发现失锁。

在自动锁模电路系统控制模块中,单片机只能支持处理 8 MHz 频率方波,而先前的信号整形

模块已经对信号进行了 1/4 的分频。考虑到还需要能够识别对可能出现的临界的倍频谐波状态,因此本系统能够支持的激光器的重复频率上限为 $8 \times 4 / 2 = 16$ MHz。通过在单片机前加高速 D 触发器降频或选用性能更加强大的单片机,可以实现对更高重复频率的激光器的支持。

6 结 论

本文实现的自动锁模电路能够对锁模激光脉冲转化而成的短上升沿高速信号进行处理和有效识别,通过识别光信号的状态能够调控最高重复频率为 16 MHz 的 NPR 被动锁模光纤激光器。该电路能在 6 ms 内监测到激光器出现的失锁状态,并在最长 10.24 s 内自动锁模并维持稳定的锁模状态。它具有体积小、重量轻、结构简单、成本低、功耗低及性能稳定的优点,可广泛应用于 NPR 被动锁模光纤激光器系统。

参考文献:

- [1] MATSAS V J, NEWSON T P, RICHARDSON D J, *et al.*. Self starting passively mode-locked fiber ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28 (15): 1391-1393.
- [2] DULING I N. All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1991, 16 (8): 539-541.
- [3] ZHAO Y, MIN S, WANG H, *et al.*. High-power figure-of-eight fiber laser with passive sub-ring loops for repetition rate control[J]. *Opt. Express*, 2006, 14(22): 10475-10480.
- [4] NICHOLSON J W, RAMACHANDRAN S, GHALMI S. A passively mode-locked, Yb-doped, figure-eight, fiber laser utilizing anomalous-dispersion higher-order-mode fiber[J]. *Opt. Express*, 2007, 15 (11): 6623-6628.
- [5] KUZIN E A, IBARRA-ESCAMILLA B, GARCIA-GOMEZ D E, *et al.*. Fiber laser mode locked by a Sagnac interferometer with nonlinear polarization rotation [J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26 (20): 1559-1561.
- [6] IBARRA-ESCAMILLA B, POTTIEZ O, HAUS J W, *et al.*. Wavelength-tunable picosecond pulses from a passively mode-locked figure-eight Erbium-doped fiber laser with a Sagnac fiber filter [J]. *J. Eur. Opt. Soc.*, 2008, 3: 1-4.
- [7] 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 (1): 82-86.
- GAO W Q, XU L X, MIN H, *et al.*. Theoretical analysis of passively mode-locked erbium-doped fiber laser with positive dispersion cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009 (1): 82-86. (in Chinese)
- [8] 张祖兴, 戴国星. 全正色散耗散孤子掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2011 (2): 0214005.
- ZHANG Z X, DAI G X. All-normal-dispersion dissipative soliton ytterbium-doped fiber laser without additional filter [J]. *Acta Optica Sinica*. 2011 (2): 0214005. (in Chinese)
- [9] 况庆强, 桑明煌, 聂义友, 等. 被动锁模掺铒光纤激光器中的有理数谐波锁模[J]. *光学精密工程*, 2009, 17 (11): 2719-2723.
- KUANG Q Q, SANG M H, NIE Y Y, *et al.*. Rational harmonic mode-locking of passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (11): 2719-2723. (in Chinese)
- [10] 刘亮, 崔俊伟, 李文景, 等. LD 泵浦的准连续输出双包层掺铒光纤激光器[J]. *中国光学*, 2012, 5 (6): 663-670.

LIU L, CUI J W, LI W J, *et al.*. Yb³⁺-doped double-clad quasi-continuous wave fiber laser pumped by laser diode[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5 (6): 663-670. (in Chinese)

- [11] TAMURA K, IPPEN E P, HAUS H A, *et al.*. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13): 1080-1082.
- [12] ZHOU X Y, YOSHITOMI D, KOBAYASHI Y,

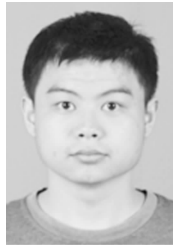
et al.. Generation of 28-fs pulses from a mode-locked ytterbium fiber oscillator[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7055-7059.

- [13] 阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- GOVIND P. *Agrawal Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. 2nd ed. . Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)

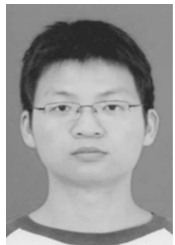
作者简介:



易 波(1963—),男,四川南充人,教授,正研级高工,1983年,1985年于中国科学技术大学物理系分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为电力电子器件与系统集成。E-mail: dikyxu@ustc.edu.cn



贾 文(1987—),男,河北黄骅人,硕士研究生,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,主要研究方向为光电传感系统设计。E-mail: jiawen@mail.ustc.edu.cn



梅 理(1990—),男,湖北武穴人,博士研究生,2011年于中国科技大学物理系获得学士学位,主要研究方向是非线性光纤光学和光纤激光器等。E-mail: meili@mail.ustc.edu.cn



陈国梁(1984—),男,安徽合肥人,博士,助理研究员,2006年于西北工业大学获得本科学位,2011年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事光纤激光器、非线性光纤光学和光纤传感等方向的研究。E-mail: glch@mail.ustc.edu.cn



徐 军(1978—),男,江苏连云港人,讲师,2000年,2002年,2006年于中国科学技术大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为光电器件与传感测量。E-mail: xujung@ustc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)