

利用啁啾脉冲光谱滤波和非线性偏振旋转技术实现高稳定性和开机自启动的全光纤掺 Yb³⁺ 光纤锁模激光器*

张攀政¹⁾ 汪小超^{1)†} 李菁辉¹⁾ 冯滔¹⁾ 张志祥¹⁾ 范薇¹⁾ 周申蕾¹⁾
马伟新²⁾ 朱俭²⁾ 林尊琪¹⁾

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院高功率激光物理重点实验室, 上海 201800)

2) (中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2016年6月4日收到; 2016年7月2日收到修改稿)

建立理论模型, 讨论了非线性偏振旋转全光纤锁模激光器的锁模过程、谐波过程以及导致激光器锁模运行难以稳定的影响因素. 讨论了采用啁啾脉冲光谱滤波产生脉冲自振幅调制、增加激光器锁模稳定性和自启动能力的机理以及非线性偏振旋转与啁啾脉冲光谱滤波相结合实现锁模的物理过程和脉冲演化过程. 研制出全光纤结构的超短脉冲掺 Yb³⁺ 光纤环状激光器, 采用非线性偏振旋转和啁啾脉冲光谱滤波相结合的锁模技术, 实现了激光器锁模的开机自启动和高稳定运行. 对激光器进行了长期运行稳定性、锁模开机自启动能力、锁模输出参数可重复性监测. 锁模脉冲中心波长 1052.9 nm, 谱宽 9.1 nm, 脉冲能量 4.25 nJ, 脉冲宽度 17.8 ps. 运行期间, 各参数波动均小于 0.3%. 开机自启动能力和可重复性测试显示, 激光器可实现一键自启动, 启动后各参数可重复精度在 0.55% 以内.

关键词: 掺 Yb³⁺ 光纤激光器, 自启动锁模, 全光纤, 稳定性

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 42.60.Lh, 42.65.-k

DOI: 10.7498/aps.65.214207

1 引言

完全由光纤器件构成的全光纤掺 Yb³⁺ 光纤锁模激光器由于其体积小、易调节、高稳定性、封闭式的波导结构等优点以及在 1 μm 波段支持高能量超短脉冲的优越性, 受到国内外很多科研组的关注. 尤其在惯性约束核聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 激光驱动装置中, 利用全光纤掺 Yb³⁺ 光纤激光器实现 1053 nm、高脉冲能量、高稳定性、可开机自启动、高重复性的超短脉冲作为“种子光源”, 是其前端系统的主要研究课题之一 [1,2].

目前已见报道的全光纤掺 Yb³⁺ 光纤锁模激光器主要有非线性偏振旋转效应 (nonlinear polar-

ization evolution, NPE) [3,4]、可饱和吸收镜 (saturable mirror, SA) [5,6], NPE 与 SA 相结合 [7], SA 与啁啾脉冲光谱滤波 (chirped pulse spectral filtering, CPSF) 相结合 [8], NPE 与 CPSF 相结合 [9-11] 几种实现锁模的方式. SA 全光纤锁模激光器输出脉冲能量一般较低 [5,6], 且存在 SA 退化问题. NPE 主要利用光纤的偏振特性 [12], 能够输出高质量的锁模脉冲, 可以得到较宽的输出光谱, 有利于脉冲的进一步腔外压缩. 但光纤偏振对温度变化及机械应变十分敏感, 所以很难实现锁模激光器的长时间稳定运行和开机一键自启动 (本文中所有提到的“一键自启动”均是指激光器开机时只需按下抽运的电源按键, 不需要任何其他调节, 激光器可自行实现锁模). Kieu 和 Wise [8] 于 2008 年通过 SA 与

* 中国科学院青年创新促进会项目和国家自然科学基金 (批准号: 61205103) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: smiles26@163.com

CPSF相结合的方式, 实现了中心波长在 1030 nm、脉冲能量为 3 nJ 的锁模, 但激光器运行几天之后, SA 便出现了退化现象. 此后, Michael 等^[9]利用波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)的光谱滤波作用结合 NPE 实现了中心波长 1040 nm 的锁模输出, 有效避免了 SA 带来的退化问题. 但激光器效率较低, 抽运功率 488 mW 时仅得到了 1.8 nJ 的最大脉冲能量, 且对激光器的运行稳定性、自启动能力以及启动输出参数可重复性并未展开相应研究.

本文对 NPE 全光纤掺 Yb³⁺ 光纤锁模激光器的锁模过程、多次谐波的形成过程进行了理论模拟, 理论研究了抽运功率、偏振态扰动等因素对激光输出及稳定的影响, 得出了全光纤激光器 NPE 锁模难以实现一键自启动和稳定运行的结论. 理论分析了 CPSF 产生脉冲自振幅调制(pulse self-amplitude modulation, PSAM) 与 NPE 相结合增加锁模稳定性和自启动能力的机理; 模拟了 CPSF 结合 NPE 实现锁模的物理过程和脉冲演化过程; 实验研究了 NPE 单独锁模以及 NPE 与 CPSF 相结合锁模的全光纤 Yb³⁺ 锁模激光器. 在正常群速度色散(group velocity dispersion, GVD) NPE 环形腔内加入光谱滤波器(spectral filter, SF) 对啁啾脉冲进行光谱滤波, 产生新的 PSAM, 同时有效抑制了 Yb³⁺ 离子 1030 nm 强发射峰对激光器 1053 nm 锁模运行的影响, 提高了激光器在 1053 nm 的锁模自启动能力和运行稳定性, 同时, 抑制了 NPE 过驱动导致的脉冲分裂, 提高了输出的脉冲能量. 激光器锁模中心波长、光谱带宽、脉冲宽度、脉冲能量都具有很高的稳定性, 运行期间, 中心波长波动值 0.01 nm, 其他各参数的波动 RMS 值均不超过 0.3%. 在反复几十次的一键开关机实验中, 激光器均实现锁模自启动, 且锁模输出参数具有高重复性: 中心波长 RMS 值 0.01 nm; 光谱带宽 RMS 值 0.55%; 脉冲宽度保持不变; 脉冲能量 RMS 值 0.1%. 具有作为主振荡器应用于 ICF 激光驱动器前端系统的重要价值.

2 实验装置及原理

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 掺 Yb³⁺ 全光纤环形腔主要由高掺杂浓度(对 979 nm 光的吸收率为

975 dB/m) 的 Yb³⁺ 光纤、偏振无关光隔离器(optical isolator, ISO)、在线偏振器(in-line polarizer, ILP)、两个偏振控制器(polarization controller, PC) PC1 和 PC2、SF、980 nm/1053 nm WDM、输出耦合器组成. 腔内器件全部是尾纤输出并直接熔接形成具有封闭式波导结构的全光纤环形腔, 所用光纤全部为普通石英单模光纤, 纤芯直径为 6 μm. 抽运源是输出波长为 980 nm 的二极管激光器, 抽运光经 980 nm/1053 nm WDM 耦合进入 Yb³⁺ 光纤. 为了充分提取腔内能量, 增加输出功率^[13], 在增益光纤之后熔接耦合器作为激光器输出端. ISO 保证了环形腔的单方向运行, 插入损耗为 0.95 dB. PC1 和 PC2 为三环式偏振控制器, 用来调节脉冲的偏振态. ILP 用来实现对脉冲偏振态的选择性通过, 结合光束在光纤中的非线性偏振旋转, 将与腔内光强相关的非线性相位调制转化为脉冲的自振幅调制, 从而形成等效的快可饱和吸收体^[14,15]. SF 透过光谱中心波长 1053 nm, 透过带宽 10 nm, 如图 2 所示. 腔内 SF 主要起到以下几方面的作用: 1) 在正常 GVD 腔内, 脉冲光谱被展宽并具有很强的频率啁啾; 利用 SF 对啁啾脉冲进行

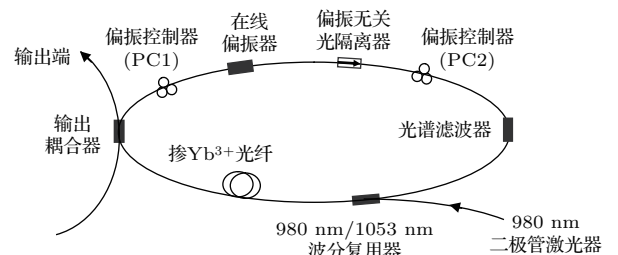


图 1 锁模激光器结构原理示意图

Fig. 1. The schematic of the mode-locking fiber laser.

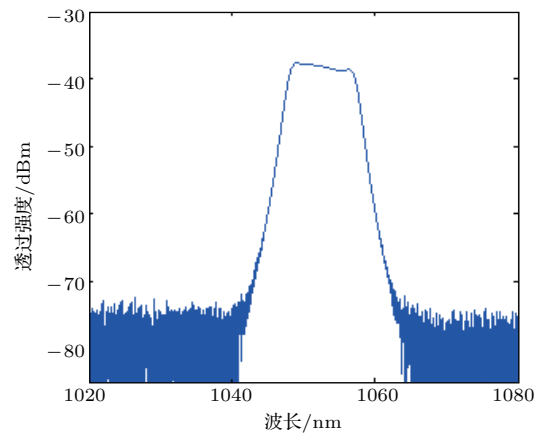


图 2 10 nm 滤波器透过率光谱

Fig. 2. The spectral transmission of the 10 nm filter.

光谱滤波,可降低脉冲边缘能量,有效压缩脉冲,从而产生新的PSAM^[16];在NPE产生PSAM作用的基础上进一步加强了激光器的锁模机理,提高了激光器的自启动能力;2)因为自相位调制(self-phase modulation, SPM),GVD导致的脉冲啁啾和SF的滤波作用受温度变化及机械应变的影响小,CPSF能提供稳定的脉冲振幅调制,使得激光器能够有效克服温度及机械应变带来的影响,相对于NPE独立锁模的方式具有更高的稳定性;3)通过光谱滤波抑制了Yb³⁺离子在1030 nm的强发射峰^[17],进一步提高了激光器在1053 nm的锁模自启动能力和运行稳定性;4)由于CPSF产生的PSAM的存在,可以降低激光器实现锁模对NPE振幅调制的要求,有效抑制NPE过驱动导致的脉冲分裂^[18],增加了锁模输出的脉冲能量.

2.2 原理及理论模型

腔内光脉冲演化的动力学过程从一个幅度较小的噪声脉冲,经历SPM、正常GVD、增益介质(掺Yb³⁺光纤)、腔损耗的共同作用,再结合PSAM作用,在腔内经过数百次循环后,最终达到稳态,实现锁模输出.实验中产生自PSAM的原理包括NPE和CPSF两种.NPE产生PSAM的基本原理如下:经过ILP和ISO的线偏振光经偏振控制器PC2的调节变为椭圆偏振光,该椭圆偏振光可以看作是两个相互垂直、具有不同强度的线偏光的合成.这两个偏振方向不同的线偏振光在腔内传输并得到放大的同时经历克尔效应,引起SPM,得到与光强有关的不同非线性相移.脉冲峰值部分比脉冲前后沿经历更多的相移,因而在相干叠加后产生更多的偏振旋转.偏振控制器PC1主要用于调整相干叠加后光脉冲各部分的偏振方向,使得脉冲峰值部分通过ILP时经历最小的损耗,而前后沿被削掉,光脉冲发生窄化,将与强度相关的非线性相位调制转化为PSAM,从而形成等效快可饱和吸收体.CPSF产生PSAM的基本原理如下:脉冲在光纤中传输,SPM引起脉冲的频率啁啾,在正常GVD引入线性啁啾的共同作用下,脉冲不断有新的频率分量产生,脉冲光谱得到极大展宽,且展宽部分的能量主要分布在脉冲的前后沿^[19];通过CPSF对该啁啾脉冲进行光谱滤波,消除边缘光谱成分,可减小脉冲前后沿能量,使脉冲得到压缩,产生PSAM.与NPE相比,CPSF产生PSAM的最大优点是受环境

影响小,且无过驱动现象,能够实现更高的稳定性和更大的单脉冲能量.

为了研究造成NPE单独锁模不稳定性的影响因素和NPE结合CPSF实现锁模的机理,在图1所示实验装置的基础上进行了模拟分析.

脉冲在单模光纤中的传输过程用非线性薛定谔方程(nonlinear Schrodinger equation, NLS)^[19]来描述:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} = i\gamma |A(z,t)|^2 A(z,t), \quad (1)$$

式中, $A(z,t)$ 为脉冲电场包络; z, t 分别为群时延坐标系中的空间坐标和时间坐标; β_2, γ 分别为光纤GVD系数和光克尔非线性系数.

增益光纤中,脉冲在经历GVD和SPM的同时得到增益放大,其传输方程为

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

式中 g 为光纤增益系数^[20,21],

$$g = \frac{g_0}{1 + \frac{1}{P_{\text{sat}} a} \int_{-\frac{1}{2}a}^{\frac{1}{2}a} |A(z,t)|^2 dt} \quad (3)$$

其中, g_0 为小信号增益系数,由Yb³⁺光纤掺杂浓度及注入抽运功率共同决定^[20]; a 是脉冲在腔内传输一周所需时间; P_{sat} 是增益饱和功率^[15],

$$P_{\text{sat}} = \frac{h\nu S}{\sigma\tau}, \quad (4)$$

这里 h 为普朗克常数, ν 为载波频率, S 为增益光纤有效模场面积, σ, τ 分别为Yb³⁺离子发射截面积和上能级寿命.

根据NPE原理,NPE导致的PSAM表现为经过ILP时的透过率 $T_{A(z,t)}$ 与脉冲瞬时功率相关:

$$T_{A(z,t)} = \sin^2 \left[\frac{1}{6} \gamma L_{\text{eff}} |A(z,t)|^2 \cos(2\theta) \right] \times \sin^2(2\theta), \quad (5)$$

其中, θ 为光纤初始信号偏振方向与光纤慢轴方向的夹角; L_{eff} 为光纤有效长度,包含了光纤损耗及增益对非线性效应的影响.忽略普通单模传输光纤的损耗, L_{eff} 表示为

$$L_{\text{eff}} = L_0 + \frac{\exp(gL_D) - 1}{g}, \quad (6)$$

其中, L_0 为腔内普通传输光纤长度, L_D 为增益光纤长度, g 为增益系数.

根据激光器的组成结构, 模拟计算中 CPSF 引起 PSAM 的作用主要表现为其透过率函数对 ILP 之后脉冲光谱的调制作用. 计算中采用的 CPSF 透过率函数由实验直接测定, 如图 2 所示. 另外, 还须考虑输出耦合损耗 (20%) 和 ISO 的插入损耗 (0.95 dB). 结合具体实验, 计算时各参数取值如下: $\sigma = 0.34 \text{ (pm)}^2$ [17], $\tau = 0.8 \text{ ms}$ [17], $\beta_2 = 23 \text{ ps}^2/\text{km}$ [22], $\gamma = 0.0047 \text{ (W}\cdot\text{m)}^{-1}$ [22].

采用分步傅里叶法对方程 (1) 和 (2) 数值求解, 并依次引入方程 (1)、方程 (5), ISO 插入损耗、CPSF、方程 (2)、输出耦合损耗的作用来描述 NPE 与 CPSF 相结合锁模激光器脉冲在腔内一周的动力学过程. 去掉 CPSF 作用, 则为 NPE 单独锁模的脉冲腔内动力学过程.

3 模拟结果

模拟分析了 NPE 锁模的演化过程. 首先模拟分析了不同抽运功率下脉冲在光纤环形腔内的演化过程. 取输出耦合比 20%, 忽略机械振动等导致的腔内偏振态抖动的影响, 抽运功率取值在 200—300 mW 之间变化.

结果如图 3 所示: 200 mW 抽运时, 由于腔内增益小于损耗无法起振; 抽运功率增加至 220 mW 时激光器开始输出稳定锁模; 抽运功率进一步增加到 240 mW 时, 激光器开始表现出 NPE 过驱动现象, 锁模自启动过程变得缓慢, 自启动能力下降, 且在锁模启动初期出现脉冲分裂和双脉冲竞争现象. 因为 GVD 的作用导致脉冲具有啁啾, 分裂后的两个脉冲具有不同的中心波长, 在腔内经历的偏振旋转量不同, 所以经过 ILP 时两个脉冲经历的损耗不同, 损耗较大的脉冲最后无法起振, 损耗小的脉冲最后形成锁模输出, 图 3(c3) 中输出脉冲在时间坐标轴上偏离 0 位置且脉冲形状严重变形正是这一现象的体现.

随着抽运功率的增加, 介质光纤增益增大, 腔内脉冲峰值功率进一步增加, NPE 过驱动越发严重, NPE 对脉冲峰值的限制作用和增益光纤对脉冲的迅速放大形成了矛盾的相互作用力. 当抽运功率增大到 260 mW 后, 激光器无法形成稳定锁模, 输出脉冲峰值开始波动, 图 3(d1) 和图 3(d2) 显示了该抽运功率下锁模启动过程中的脉冲分裂过程、分裂脉冲的竞争过程和锁模脉冲的波动情况. 随着

抽运功率的增大, 这种锁模脉冲波动愈加剧烈, 脉冲宽度不断增大, 直到 290 mW 抽运功率时锁模脉冲发生分裂, 激光器出现谐波锁模.

可以看出, NPE 锁模激光器的输出状态随抽运功率的变化会出现明显不同的输出状态. 即使不考虑偏振态抖动的影响, 能够输出稳定的单脉冲锁模的抽运范围也只有 20 mW. 随着抽运能量的增大, NPE 过驱动导致了锁模脉冲的波动和多次谐波的出现, 成为限制单脉冲能量和稳定性的主要因素.

温度变化、机械振动等环境的波动, 会直接影响脉冲在腔内的偏振状态, 成为影响 NPE 锁模激光器稳定性的又一重要因素. 为了分析这一现象, 在固定抽运功率 220 mW 不变的情况下, 模拟了脉冲在光纤激光腔内偏振态抖动造成的影响. 用脉冲进入 ILP 之前与 ILP 偏振态夹角的变化来体现偏振态抖动, 取值范围 $6\pi/38$ 到 $14\pi/38$, 取值间隔 $\pi/38$.

输出结果如图 4 所示, 激光器实现稳定的单脉冲锁模所允许的偏振夹角变化范围为 $9\pi/38$ — $10\pi/38$. 夹角超出此变化范围, 激光器锁模状态就会被破坏. 说明 NPE 锁模激光器的输出状态对偏振态敏感, 偏振态的微小变化就会对激光器的输出状态产生影响, 意味着实际应用中该激光器对环境稳定性具有非常严格的要求.

偏振状态主要是通过影响腔内脉冲不同偏振分量间的非线性相位差, 从而影响脉冲到达 ILP 时的偏振状态实现的, 而且影响程度会随着激光器腔长、抽运能量的增加进一步加剧. 这种偏振状态引起的不稳定性是 NPE 光纤锁模激光器的固有特点, 是由其根本的锁模机理所决定的, 只通过对腔结构参数如 Yb^{3+} 光纤长度、腔长、抽运能量、输出耦合比等进行优化只能在一定程度上减小这种不稳定性, 不能从根本上有效解决这一问题.

在 NPE 的数值模型中加入 SF 的作用, 可得到典型的 NPE 结合 CPSF 锁模的脉冲演化过程. 如图 5 所示: 在最初的几圈里, 脉冲幅度迅速上升, 这是因为噪声脉冲很小, 经历较高的小信号增益, 增益远远大于损耗的缘故; 随着脉冲的不断增强, 开始出现增益饱和, 当增益与损耗相同时, 脉冲振幅达到最大值; 随着脉冲的传输, SPM 导致脉冲光谱极大展宽, CPSF 开始发挥作用, 脉冲一部分能量

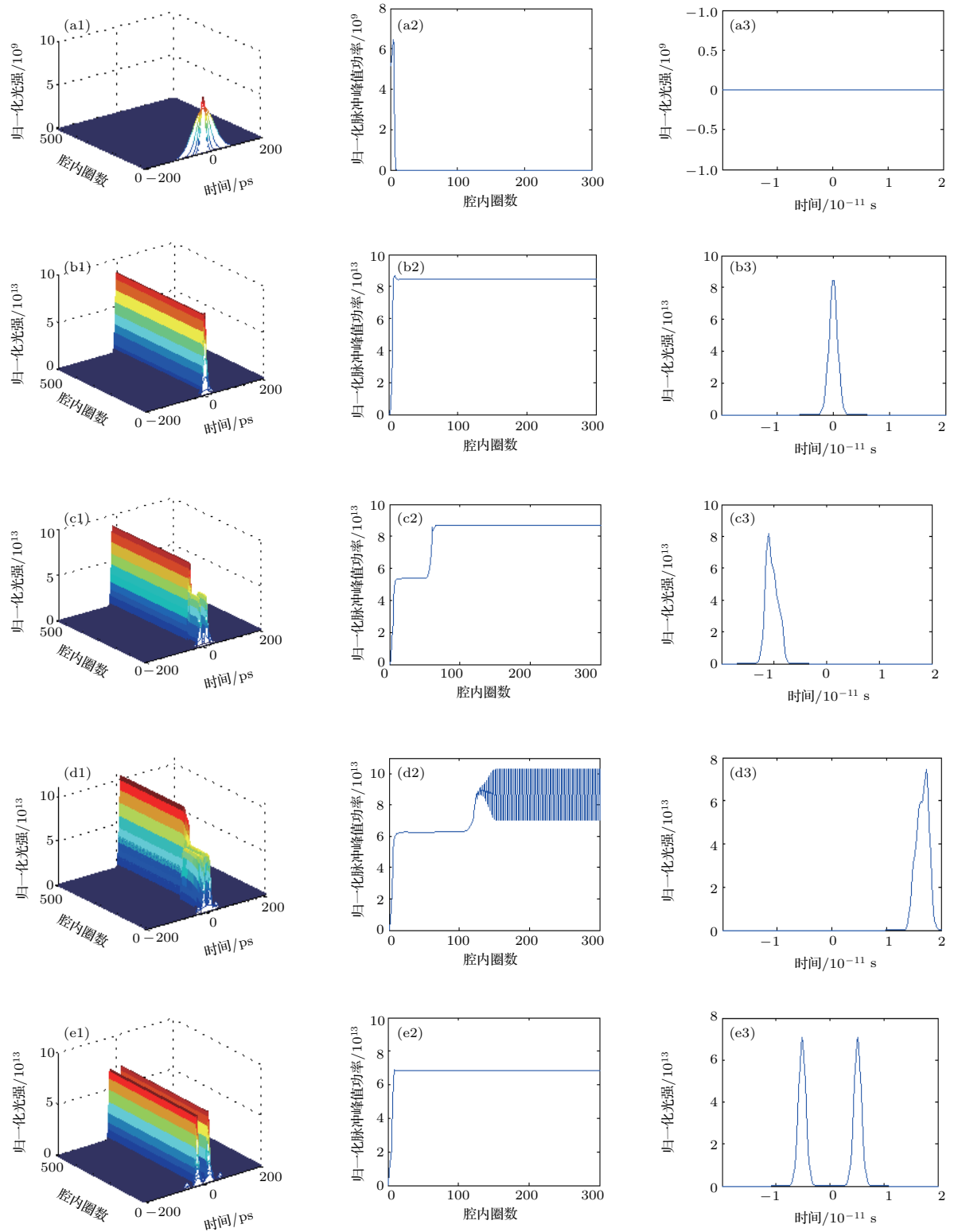
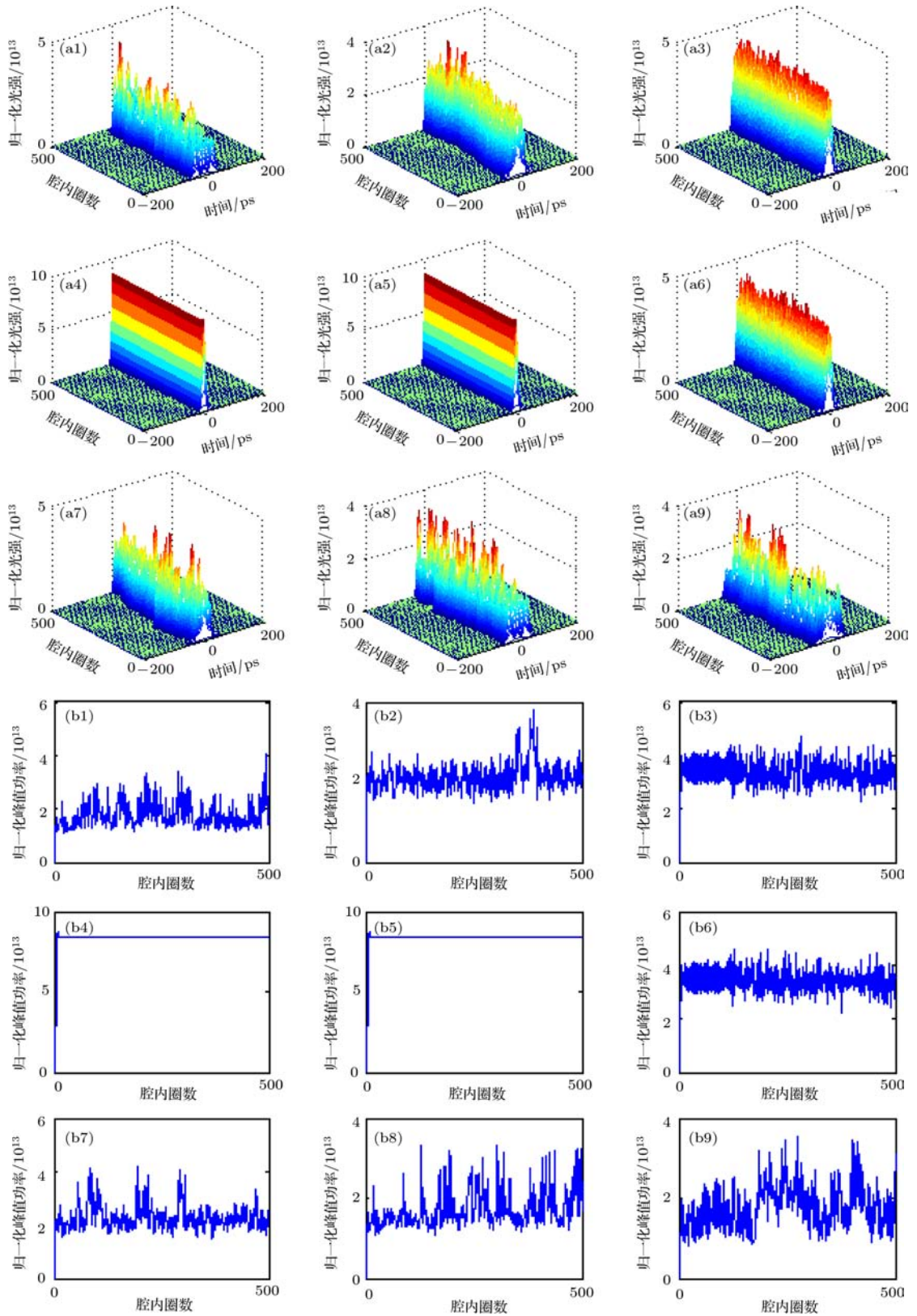


图3 (网刊彩色) 不同抽运功率下脉冲在光纤激光腔内的演化过程、脉冲峰值能量随腔内传输圈数的变化过程和最终输出的脉冲形状 (第一列为脉冲演化过程, 第二列为脉冲峰值功率演化过程, 第三列为输出脉冲形状) (a) 抽运功率 200 mW; (b) 抽运功率 220 mW; (c) 抽运功率 240 mW; (d) 抽运功率 260 mW; (e) 抽运功率 290 mW

Fig. 3. (color online) The evolution of the pulse and the pulse peak power in laser cavity and the output pulse shape with different pumping power: (a) With pumping power of 200 mW; (b) with pumping power of 220 mW; (c) with pumping power of 240 mW; (d) with pumping power of 260 mW; (e) with pumping power of 290 mW. The first column is the pulse evolution. The second column is the pulse peak power evolution. The third column is the output pulse shape.

被 CPSF 阻挡, 引起损耗的增加; 同时, NPE 引起的脉冲 SAM 也开始增强, 进一步加大了脉冲能量的损耗, 脉冲振幅开始缓慢下降; 下降了脉冲振幅又同时减弱了增益饱和, 增益升高, 腔内增益与

损耗的差值越来越小, 脉冲的减小速度逐渐缓慢, 脉冲振幅、宽度、光谱逐渐趋于稳定. 经历上百圈的变化以后, 脉冲增益和损耗达到平衡, 激光器进入稳定的锁模状态.



(Continued)

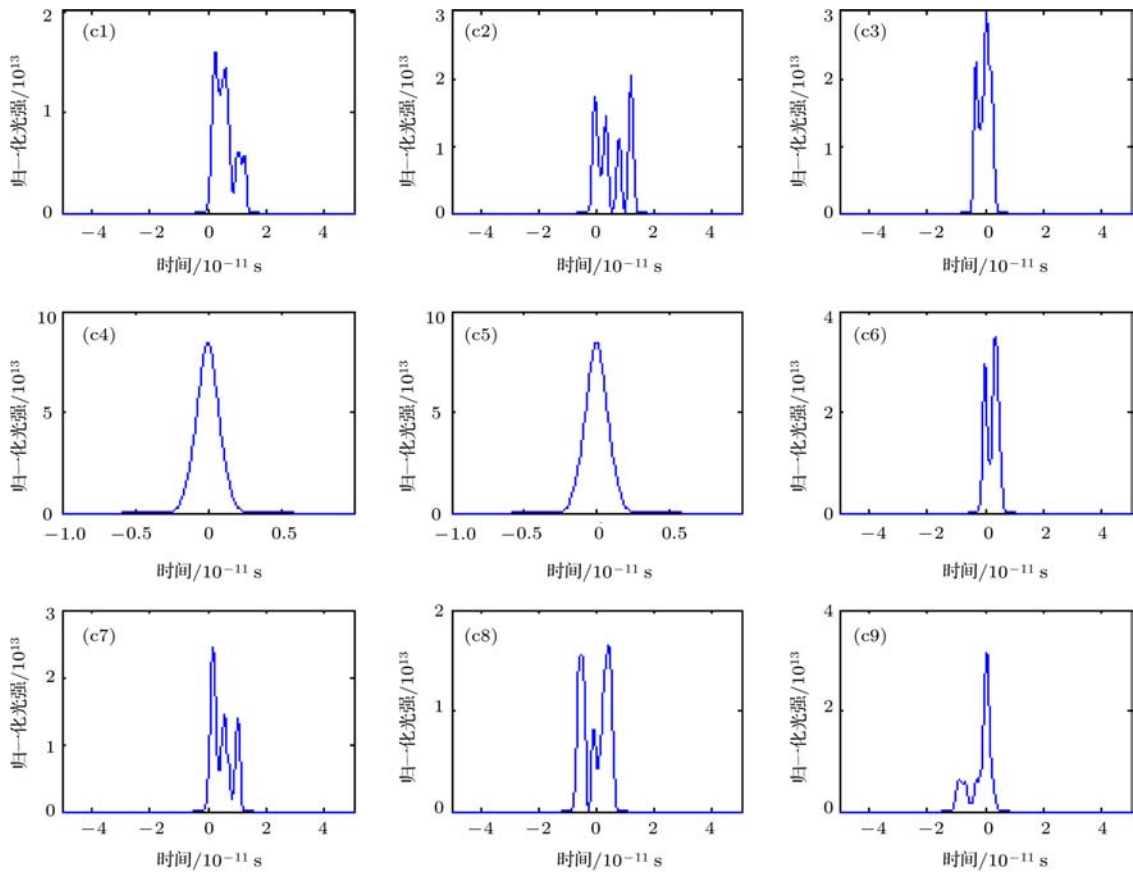


图4 (网刊彩色) 不同偏振状态下脉冲在腔内的演化过程及输出状态 (a1)—(a9) 脉冲在腔内的演化过程; (b1)—(b9) 激光器脉冲功率峰值的演化; (c1)—(c9) 激光器输出脉冲形状
 Fig. 4. (color online) The evolution of the pulse in laser cavity with different initial polarization: (a1)—(a9) The evolution of the pulse in laser cavity; (b1)—(b9) the evolution of pulse peak power; (c1)—(c9) the output pulse shape.

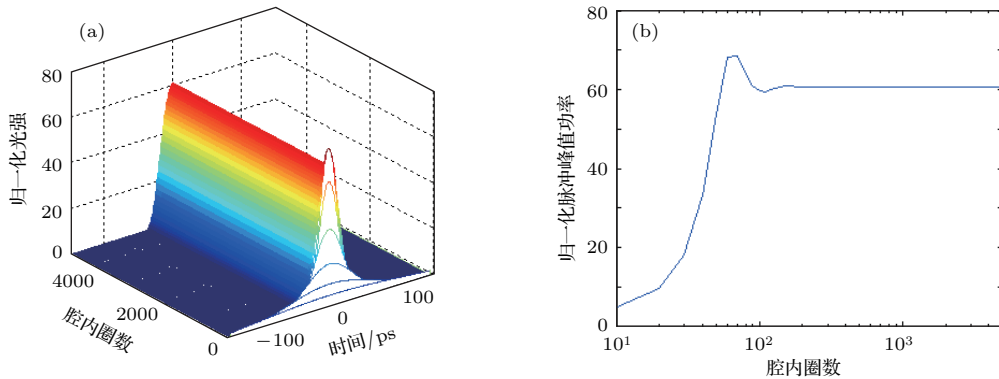


图5 (网刊彩色) 激光器脉冲形状及脉冲峰值功率的演化 (a) 脉冲的演化; (b) 脉冲峰值功率的演化
 Fig. 5. (color online) The evolution of (a) the pulse shape and (b) the pulse peak power.

图6为激光器稳定锁模以后, 脉冲在激光器各部分的光谱图. 可以看出, 经CPSF之后的脉冲频谱(划线)相比滤波之前的脉冲频谱(点线)明显变窄, 表明CPSF在锁模启动过程中确实起到了重要的作用. 输出端锁模脉冲频谱图(实线)具有陡峭的边沿, 并在边缘附近存在略微凸起的尖峰. 这主要是由单模光纤中SPM和CPSF共同作用产生, 是

CPSF实现锁模的典型特征之一^[16].

4 实验结果

4.1 NPE锁模实验结果

采用如图1所示的实验装置, 去掉腔内的光谱滤波器, 搭建了典型的NPE锁模全光纤环形激

光器. 环形腔总长为13.6 m, 对应的脉冲重复频率和GVD值分别为 15.25 MHz和0.300 ps². 激光器采用较高掺杂浓度(对979 nm光的吸收率为975 dB/m)的两段长30 cm的Yb³⁺ 光纤作为增益介质. 抽运源是两台输出波长为978 nm的二极管激光器, 最大输出功率分别为350 mW(抽运1)和270 mW(抽运2), 抽运光经980 nm/1053 nm WDM分别耦合进入Yb³⁺ 光纤. 在增益光纤之后熔接耦合器作为激光器输出端, 耦合器输出耦合比为20%.

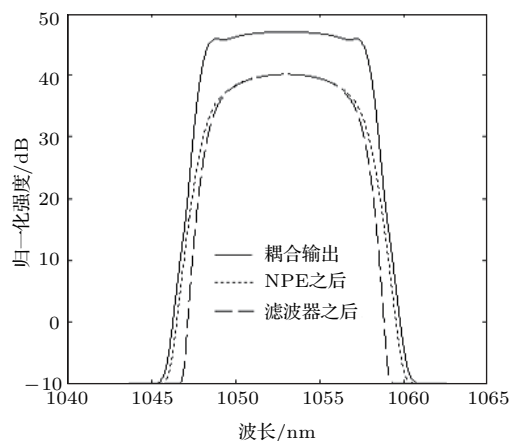


图6 脉冲在锁模激光器不同位置处的光谱图

Fig. 6. Spectrum of the pulse in different positions in the mode-locked laser cavity.

增加抽运能量并仔细调节PC1, PC2, 得到连续锁模输出. 用高速探测器(8 GHz)结合12 GHz示波器观测输出锁模脉冲序列, 结果如图7所示, 锁模脉冲间隔约65.6 ns, 与腔长相符合. 锁模脉冲光谱如图8(a)所示, 初始中心波长为1053.44 nm, 光谱宽度为10 nm. 输出平均功率1.24 mW, 对应平均单脉冲能量约为82 pJ.

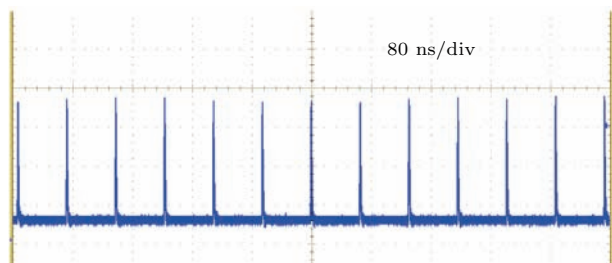


图7 NPE锁模激光器输出锁模脉冲序列

Fig. 7. Output pulse train of the laser mode-locked by NPE.

此时, 如继续增大抽运能量, 激光器很快出现过驱动现象, 进入锁模不稳定区. 进一步增大抽运能量, 则出现二次谐波.

在激光器锁模状态下, 保持抽运功率不变(抽运1, 274 mW; 抽运2, 267 mW), 观察锁模输出随时间的变化情况. 如图8所示, 激光器1053 nm锁模无法长时间稳定运行, 随着运行时间的增加, 1030 nm噪声信号对锁模的冲击越来越明显, 150 min以后, 以1036 nm为中心波长的噪声信号已经占据大部分的输出能量, 激光器失锁.

上述的激光器运行稳定性观测结果说明, 该激光器在1053 nm锁模的运行状态只是暂时稳定的. 随着运行时间的增加, 激光器本身温度的变化以及外界环境的波动会对初始锁模时的平衡态产生破坏, 1030 nm噪声变得越来越强, 直至激光器失锁. 这一现象进一步证明了在激光腔内加入另一种既能克服外界干扰增加锁模稳定性, 又能抑制1030 nm分量的PSAM作用的必要性. 而CPSF技术正好具备这些优点, 与NPE相结合, 可以大幅提高锁模激光器的自启动能力、输出性能及运行稳定性.

4.2 NPE与CPSF相结合实现锁模的实验结果

在NPE单独锁模实验装置的基础上保持其他条件不变, 在偏振控制器PC2之后加入一个光纤光谱滤波器, 则形成典型的NPE结合CPSF锁模的全光纤环形腔. 滤波器通带中心波长1053 nm, 通带宽度10 nm, 如图2所示.

通过调节PC状态, 激光器较易实现1053 nm中心波长的稳定锁模. 锁模阈值抽运功率为480 mW(抽运1, 310 mW; 抽运2, 170 mW). 输入抽运总能量为760 mW时, 激光器输出平均功率为68.88 mW(图9(a)), 对应单脉冲能量为4.25 nJ, 相比NPE单独锁模有大幅的提高. 锁模脉冲序列稳定(图9(b)), 脉冲间隔61.6 ns. 锁模中心波长1053 nm, 光谱带宽为9.1 nm, 具有啁啾脉冲光谱滤波锁模的典型特征: 陡峭的前后边沿以及边缘处的小尖峰(图9(c)). 输出脉冲宽度为17.8 ps(图9(d)).

激光器锁模运行稳定, 微小振动或小范围的温度变化不会对锁模产生影响. 在锁模状态下, 固定抽运功率及PC状态不变, 不做其他任何调节, 环境温度保持(20±1) °C, 对激光器的稳定性进行了测试. 测试内容包括锁模中心波长、光谱带宽、输出功率、脉冲宽度.

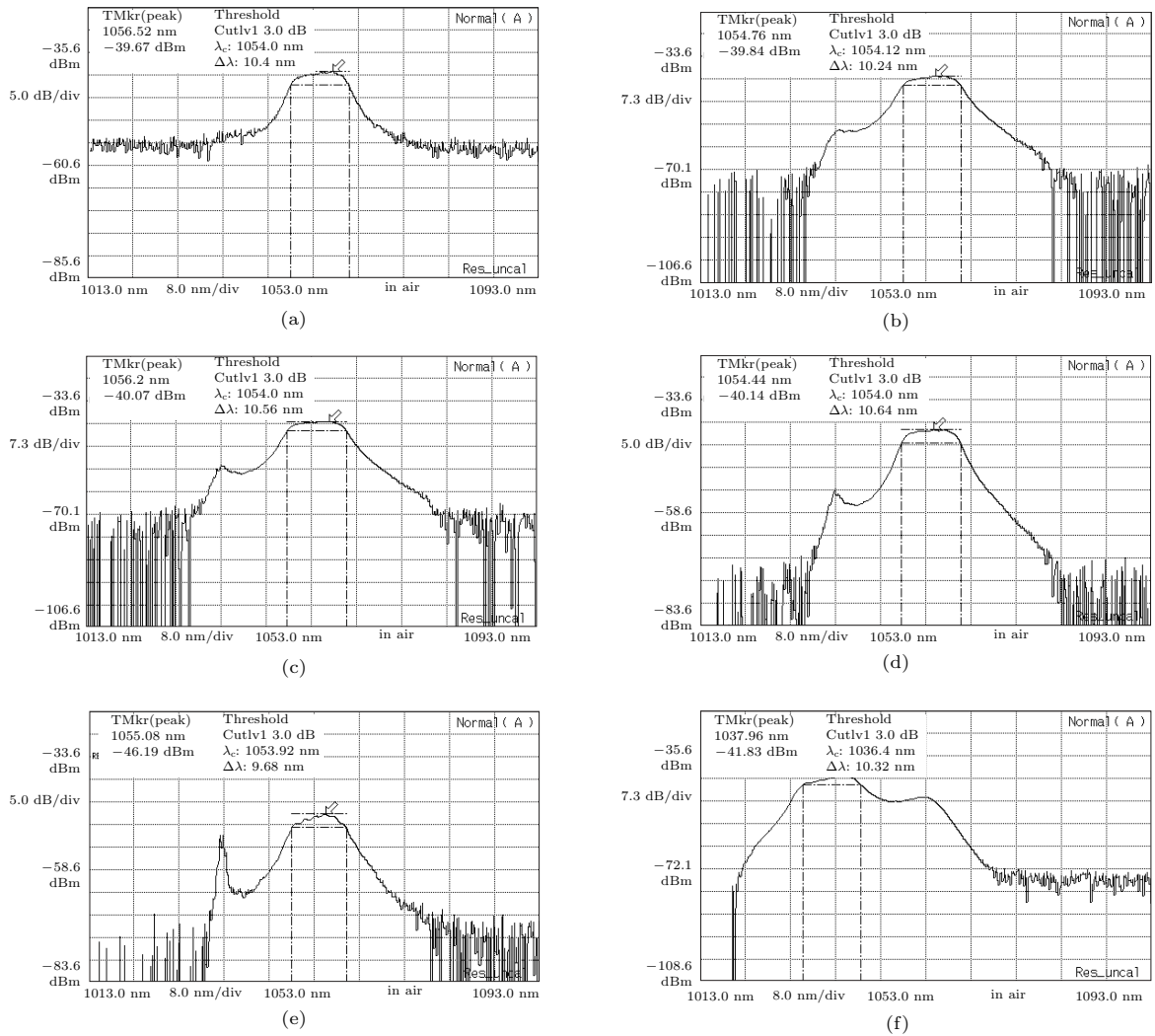


图8 NPE锁模光纤激光器输出光谱随运行时间的变化 (a) 初始输出光谱; (b) 15 min 后的输出光谱; (c) 30 min 后的输出光谱; (d) 45 min 后的输出光谱; (e) 60 min 后的输出光谱; (f) 150 min 后的输出光谱

Fig. 8. The evolution of the output spectrum of the mode-locked laser by NPE with operation time: (a) The initial output spectrum; (b) output spectrum after 15 minutes operating; (c) output spectrum after 30 minutes operating; (d) output spectrum after 45 minutes operating; (e) output spectrum after 60 minutes operating; (f) output spectrum after 150 minutes operating.

如图10(a)所示, 锁模中心波长平均值为1052.9 nm, 波动RMS值0.02 nm (测试用光栅光谱仪的测量精度0.02 nm). 如图10(b)所示, 光谱带宽平均值为9.1 nm, 跳动RMS值为0.03 nm, 占光谱带宽的0.3%. 如图10(c)所示, 输出功率平均值36.1 mW, 跳动RMS值为0.02 mW, 仅占平均值的0.06%.

利用自相关仪对脉冲宽度进行监测, 如图10(d)所示. 为了能够测量脉冲的真实宽度和脉冲宽度的稳定性, 分别采用150 ps扫描范围和50 ps扫描范围对脉宽进行监测. 自相关仪扫描范围采用150 ps时, 测得脉冲宽度始终为17.8 ps, 在

观测时间内不发生跳动. 换成50 ps扫描范围, 测得的脉冲宽度平均值为16.9 ps, 脉宽跳动的RMS值小于0.05 ps. 如图11(a)所示, 150 ps扫描范围可以测到完整的脉冲自相关曲线, 能够得出脉冲宽度的真实值, 但分辨率相对文中激光器的稳定性显得不够. 如图11(b)所示, 50 ps扫描范围具有更高的测量分辨率, 测到了RMS 0.05 ps的宽度波动, 但由于文中脉宽正好处于这一扫描范围可测量的最大值附近, 脉冲前后沿基底部分的自相关数据可能会丢失, 所以测得的脉冲宽度与真实宽度有一定差别. 所以文中激光器输出的脉冲宽度应该为17.8 ps, 宽度抖动RMS值为0.05 ps.

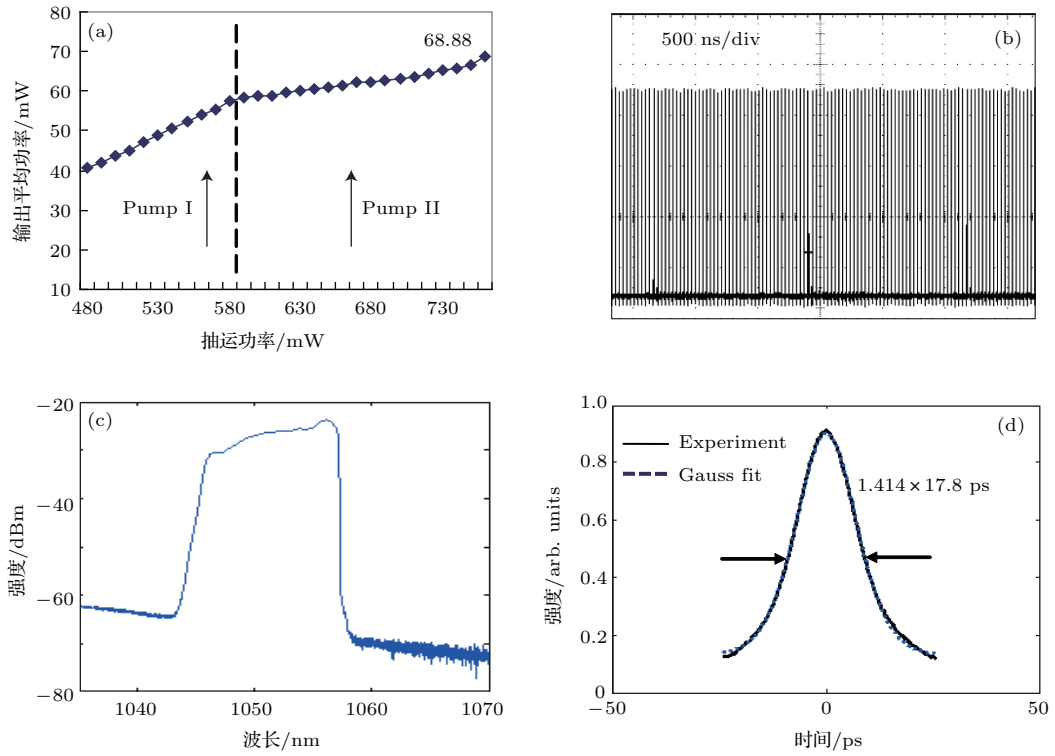


图9 (网刊彩色) NPE与CPSF相结合的锁模激光器输出状态 (a) 平均功率随抽运能量的变化; (b) 输出脉冲序列图; (c) 输出光谱; (d) 锁模脉冲自相关曲线图

Fig. 9. (color online) Output parameters of the laser mode-locked by NPE and CPSF: (a) Output power evolution with pumping power; (b) pulse train; (c) output spectrum; (d) autocorrelation of the output pulse.

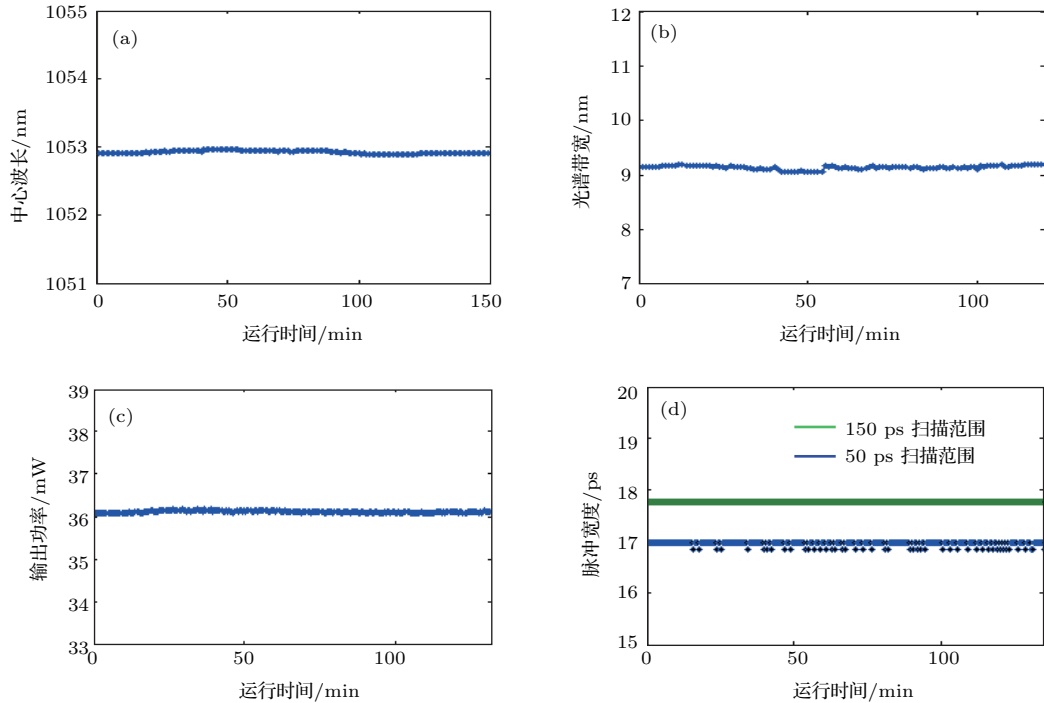


图10 (网刊彩色) 激光器锁模运行稳定性测试结果 (a) 锁模中心波长稳定性; (b) 锁模光谱带宽稳定性; (c) 锁模输出功率稳定性; (d) 脉冲宽度稳定性

Fig. 10. (color online) The operating stability of the mode-locked laser: (a) Stability of the central wavelength; (b) stability of the spectral width; (c) stability of the output power; (d) stability of the pulse width.

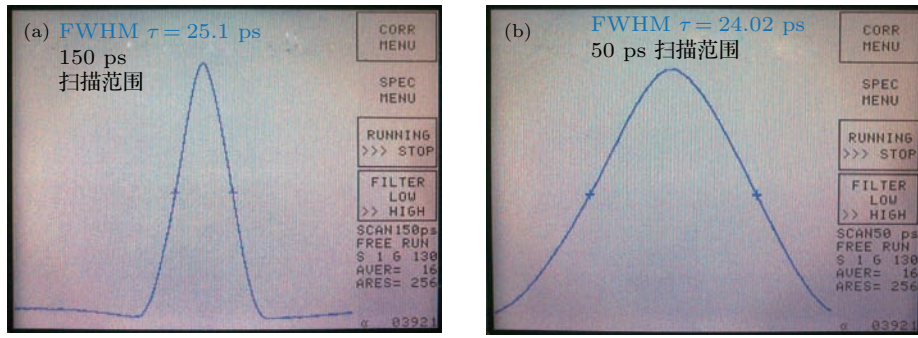


图 11 自相关仪不同扫描范围的脉冲自相关曲线 (a) 150 ps 扫描范围; (b) 50 ps 扫描范围

Fig. 11. The autocorrelation of the pulse with different scanning range: (a) With scanning range of 150 ps; (b) with scanning range of 50 ps.

保持相同的抽运功率及环境条件, 对激光器的开机自启动能力和启动输出参数重复性进行了测试. 具体测试方法如下: 在激光器锁模运行状态下直接关闭抽运的供电电源, 待冷却一段时间后重新打开抽运电源 (只需按下抽运的电源开关键, 不进行任何调节), 测试激光器是否自行启动锁模并记录每次锁模输出的参数. 为了将冷却时间对激光器的影响也包括在内, 开机和关机之间的时间间隔随机分布. 该测试持续总时间两周, 在此期间, 对激光器 PC 状态、抽运能量等不进行任何调节, 环境温

度保持在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$.

测试结果如图 12 所示, 激光器在几十次的开关机实验中都能实现 1053 nm 中心波长的自启动锁模, 且锁模输出参数不发生明显变化, 具有很好的开机自启动能力和可重复性.

开机自启动测试实验共进行了 48 次, 前 20 次进行中心波长和光谱宽度的测试, 后 28 次进行了锁模输出功率和脉冲宽度的测试. 中心波长开机测试结果如图 12 (a) 所示, 20 次开机实验中, 自启动锁模输出中心波长平均值为 1052.9 nm, 重复精

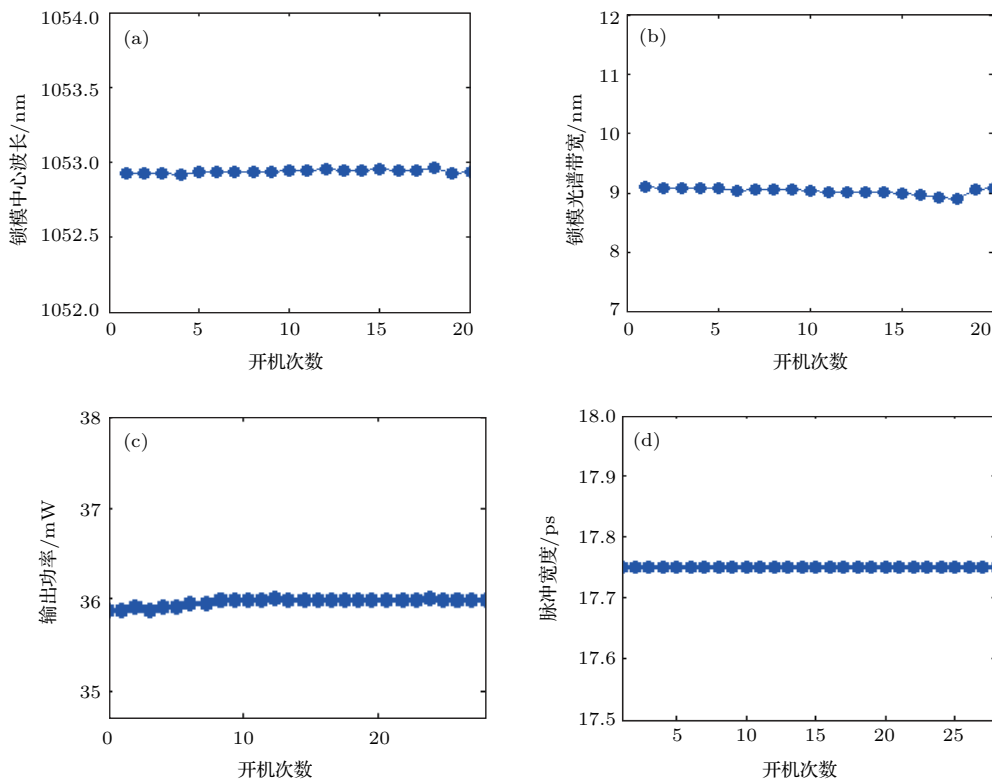


图 12 激光器锁模一键开机自启动后输出参数的变化 (a) 锁模中心波长; (b) 锁模光谱带宽; (c) 锁模输出功率; (d) 锁模脉冲宽度

Fig. 12. The output parameters of the mode-locked laser after one-key self-started: (a) Central wavelength; (b) width of spectrum; (c) output power; (d) width of pulse.

度0.01 nm, 小于光栅光谱仪测量精度(0.02 nm). 光谱带宽开机测试结果如图12(b)所示, 20次开机实验中, 自启动锁模输出光谱带宽平均值为9.1 nm, 重复精度0.05 nm, 为平均光谱带宽的0.55%. 输出功率开机测试结果如图12(c)所示, 28次开机实验中, 自启动锁模输出平均功率的平均值为36.1 mW, 重复精度0.04 mW, 占平均值的0.1%. 在输出脉冲宽度的测试实验中, 为了能够观测是否有多次谐波出现, 将自相关仪的扫描范围设定为150 ps, 测试结果如图12(d)所示, 28次开机实验中, 激光器自启动锁模为单脉冲锁模, 锁模脉冲宽度均为17.75 ps.

5 结 论

通过理论和实验研究了NPE锁模全光纤掺Yb³⁺光纤环形激光器在1053 nm的锁模开机自启动和稳定性特点, 证明了该激光器在1053 nm锁模运行不稳定和开机自启动难是由其锁模机理所决定的必然特征. 在全正常色散NPE环形腔内加入光纤光谱滤波器, 在抑制1030 nm噪声信号干扰的同时, 利用CPSF产生的PSAM可以有效改善激光器的锁模运行稳定性和自启动能力, 同时也可以有效抑制NPE过驱动导致的脉冲分裂, 增加输出脉冲能量. 理论研究了NPE结合CPSF锁模的动力学原理和脉冲在腔内的演化过程. 搭建了采用NPE结合CPSF锁模技术的全光纤掺Yb³⁺单模光纤环形激光器, 获得了中心波长1052.9 nm, 3 dB带宽9.1 nm, 脉冲能量4.25 nJ, 脉宽17.8 ps的单脉冲锁模. 激光器锁模运行稳定, 运行期间中心波长波动值0.01 nm, 其他各参数波动RMS均小于0.3%. 激光器具有较强的自启动能力和输出参数可重复性, 中心波长重复精度为0.01 nm, 其他各参数的重复精度均在0.55%以内. 具有作为主振荡器应用于ICF激光驱动器前端系统的重要价值.

参考文献

- [1] Dawson J W, Liao Z M, Jovanovic I, Wattellier B, Beach R, Payne S A, Barty C P J 2003 *Proc. SPIE UCRL-JC-152561*
- [2] Dawson J W, Liao Z M, Mitchell S, Messerly M, Beach R, Jovanovic I, Brown C, Payne S A, Barty C P J 2005 *Proc. SPIE UCRL-CONF-209779*
- [3] Yang L Z, Chen G F, Wang Y S, Zhao W, Ding G L, Xiong H J 2005 *Chin. J. Lasers* **32** 153 (in Chinese) [杨玲珍, 陈国夫, 王屹山, 赵卫, 丁广雷, 熊红军 2005 中国激光 **32** 153]
- [4] Lin H H, Sui Z, Li M Z, Wang J J 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 825 (in Chinese) [林宏矣, 隋展, 李明中, 王建军 2006 强激光与粒子束 **18** 825]
- [5] Gu Q Y, Hou J, Cheng X A, Xu X J 2008 *Chin. J. Lasers* **3** 5 (in Chinese) [谷庆元, 侯静, 程相爱, 许晓军 2008 中国激光 **3** 5]
- [6] Zhang P Z, Fan W, Wang X C, Lin Z Q 2011 *Chin. J. Lasers* **8** 3 (in Chinese) [张攀政, 范薇, 汪小超, 林尊琪 2011 中国激光 **8** 3]
- [7] Prochnow O, Ruehl A, Schultz M, Wandt D, Kracht D 2007 *Opt. Express* **15** 6889
- [8] Kieu K, Wise F W 2008 *Opt. Express* **16** 11453
- [9] Michael S, Heike K, Oliver P, Doeter W, Uwe M, Dietmar K 2008 *Opt. Express* **16** 19562
- [10] Zhang P Z, Fan W, Wang X C, Lin Z Q 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 8
- [11] Zhang P Z, Fan W, Wang X C, Lin Z Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024206 (in Chinese) [张攀政, 范薇, 汪小超, 林尊琪 2011 物理学报 **60** 024206]
- [12] Luo Z C, Xu W C, Song C X, Luo A P, Chen W C 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1674
- [13] Bale B G, Kutz J N, Chong A, Renninger W H, Wise F W 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 1763
- [14] Ilday F Ö, Buckley J R, Lim H, Wise F W, Clark W G 2003 *Opt. Lett.* **28** 1365
- [15] Komarov A, Leblond H, Sanchez F 2005 *Phys. Rev. A* **71** 053809
- [16] Chong A, Buckley J, Renninger W, Wise F 2006 *Opt. Express* **14** 10095
- [17] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, Hanna D C 1997 *IEEE J. Quantum Elect.* **33** 1049
- [18] Buckley J, Chong A, Zhou S, Renninger W, Wise F W 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1803
- [19] Agrawal G P (translated by Jia D F, Yu Z H, Tan B, Hu Z Y) 2002 *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp26–31, 64–71, 132–140 (in Chinese) [Agrawal G P 著 (贾东方, 余震虹, 谈斌, 胡智勇译) 2002 非线性光纤光学原理及应用 (北京: 电子工业出版社) 第26–31, 64–71, 132–140页]
- [20] Wang Y H, Ma C S, Li D L, Zheng J 2008 *Acta Opt. Sin.* **37** 855 (in Chinese) [汪玉海, 马春生, 李德禄, 郑杰 2008 光学学报 **37** 855]
- [21] Liu H G, Hu M L, Song Y J, Li Y F, Chai L, Wang C Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014215
- [22] Ilday F Ö, Buckley J R, Clark W G, Wise F W 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 213902

Highly stable and self-started all-fiber Yb³⁺ doped fiber laser mode-locked by chirped pulse spectral filtering and nonlinear polarization evolution*

Zhang Pan-Zheng¹⁾ Wang Xiao-Chao^{1)†} Li Jing-Hui¹⁾ Feng Tao¹⁾ Zhang Zhi-Xiang¹⁾
Fan Wei¹⁾ Zhou Shen-Lei¹⁾ Ma Wei-Xin²⁾ Zhu Jian²⁾ Lin Zun-Qi¹⁾

1) (Key Laboratory of High Power Laser and Physics, CAS, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2) (Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

(Received 4 June 2016; revised manuscript received 2 July 2016)

Abstract

Without discrete optical components influencing the fiber format, all-fiber mode-locked laser has tremendous potential practical applications due to its advantages of better stability, alignment free, and better compaction. All-fiber laser mode-locked by nonlinear polarization evolution (NPE) can obtain good performances in terms of pulse duration and spectrum. But the effective saturable absorption mirror can be overdriven at high peak power, which leads to multiple pulses, limiting the output pulse energy. And there is a trade-off between avoiding overdriving the NPE and ease of self-starting. In addition, the polarization of the pulse propagating in a long fiber is so sensitive to the environment vibration that it is difficult to implement a stable lone-time operation.

All-fiber ring laser mode-locked by NPE alone is analyzed and realized. The simulation results show that even a polarization vibration of $\pi/38$ can break the mode-locking completely. Experimentally, after carefully adjusting, single-pulse mode-locking is achieved with the spectrum centered at 1053.4 nm and a maximum pulse energy of 82 pJ. But the output parameters change continually during operating. After 60 min, the mode-locking is broken. The conclusion is obtained that instability and unreliability of self-starting are inevitable for such a laser.

Here, we show significant improvements of the pulse energy, operating stability, and self-starting reliability from an all-fiber Yb-doped mode-locked fiber laser. The laser is mode-locked by NPE combined with chirped pulse spectral filtering (CPSF). In order to easily self-start and stabilize mode locking, a spectral filter is employed in the all-normal group velocity dispersion NPE cavity to provide additional amplitude modulation. Combined effects of NPE and CPSF result in desirable pulse output, desirable operating stability, and reliable self-starting simultaneously. Stable mode-locking centered at 1053 nm is achieved with a 3 dB spectral bandwidth of 9.1 nm and pulse duration of 17.8 ps. The average output power is 66.9 mW at a repetition rate of 15.2 MHz, corresponding to a pulse energy of 4.25 nJ. Especially, high operating stability and easily one-button self-starting are achieved simultaneously. The fluctuations of output parameters including pulse energy, pulse duration, and spectrum are within 0.3% during 150-min operation. Self-starting reliability is tested. The testing time lasts two weeks. During the two weeks, the laser is turned off and turned on 48 times by using a power supplying button, without any adjustment. And the re-turned on intervals change randomly. Each time, the mode-locking can start itself. The repeatabilities of output parameters including pulse energy, pulse duration, and spectrum are within 0.55%.

Keywords: Yb³⁺ doped fiber laser, self-started mode locking, all-fiber, stability

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 42.60.Lh, 42.65.-k

DOI: 10.7498/aps.65.214207

* Project supported by the Youth Innovation Promotion Association CAS and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61205103).

† Corresponding author. E-mail: smiles26@163.com