

利用光谱滤波器实现自启动的全光纤超短脉冲掺 Yb^{3+} 光纤激光器

张攀政[†] 范薇 汪小超 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率与物理联合实验室, 上海 201800)

(2009 年 11 月 15 日收到; 2010 年 4 月 27 日收到修改稿)

讨论了利用光谱滤波器实现自启动的被动锁模掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器的锁模机理, 并研制出全光纤结构超短脉冲掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器. 使用 980 nm 二极管激光器作为抽运源, 高掺杂浓度掺 Yb^{3+} 光纤作为增益介质. 在净群速度色散为正的环形腔中加入光谱滤波器, 抑制 Yb^{3+} 离子在 1030 nm 强发射峰的同时, 通过对啁啾脉冲的光谱滤波实现脉冲压缩. 光谱滤波器与光纤非线性偏振旋转效应相结合, 实现了激光器在 1053 nm 可自启动、十分稳定的锁模运转. 激光器锁模阈值功率 300 mW, 平均斜率效率 18.3%, 最大输出功率 53.07 mW, 对应最大输出脉冲能量 3.2 nJ. 锁模光脉冲中心波长 1053.6 nm, 3 dB 带宽 10.84 nm, 重复频率 16.45 MHz. 锁模脉冲宽度为皮秒量级, 经腔外光栅对压缩至 188 fs.

关键词: 掺 Yb^{3+} 光纤激光器, 自启动锁模, 全光纤

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc

1. 引言

完全由光纤器件构成的全光纤掺 Yb^{3+} 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广泛关注. 尤其在惯性约束核聚变 (ICF) 激光驱动装置中, 利用全光纤掺 Yb^{3+} 光纤激光器实现 1053 nm、高脉冲能量、高稳定性、百飞秒的超短脉冲作为“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 Yb^{3+} 光纤锁模激光器主要有非线性偏振旋转效应 (NPE)^[3-6]、NPE 与可饱和吸收镜 (SA) 相结合^[7]、SA 与光谱滤波器 (SF) 相结合^[8]、NPE 与 SF 相结合^[9] 几种实现锁模的方式. 国内的研究主要集中在不同的抽运光抽运方式下通过 NPE 实现锁模. 其中, 林宏免等^[6] 采用双向抽运高掺杂 (对抽运光的吸收率为 2100 dB/m) Yb^{3+} 光纤的结构, 入纤抽运功率 220 mW 时得到了中心波长 1046 nm, 脉冲能量 1.3 nJ 的锁模输出, 是目前国内报道的全光纤掺 Yb^{3+} 锁模激光器的最大脉冲能量. 但由于 NPE 主要利用光纤的偏振特

性^[10], 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自启动功能. 国际上报道的全光纤掺 Yb^{3+} 锁模激光器主要采用多种锁模机理相结合的方式, 通过多种锁模机理同时作用有效实现了激光器的开机自启动和良好的稳定性. 其中, Kieu 和 Wise^[8] 于 2008 年通过 SA 与 SF 相结合的方式, 实现了中心波长在 1030 nm, 脉冲能量为 3 nJ 的锁模脉冲输出, 是已见报道的单包层全光纤掺 Yb^{3+} 光纤锁模激光器的最大输出脉冲能量. 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 (WDM) 的滤波作用结合 NPE 实现了中心波长 1040 nm 的锁模输出, 有效地避免了 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.

本文报道的全光纤掺 Yb^{3+} 光纤激光器采用 NPE 与 SF 相结合实现锁模. 在正常群速度色散 (GVD) 环形腔内加入 SF 对啁啾脉冲进行光谱滤波, 实现了脉冲的再次压缩, 产生新的脉冲自振幅调制, 同时有效抑制了 Yb^{3+} 离子 1030 nm 强发射峰对激光器 1053 nm 锁模运行的影响, 从而提高了激光器在 1053 nm 的锁模自启动能力和运行稳定性,

[†] E-mail: nwpuzhangpanzheng@yahoo.cn

并避免了激光器元件退化带来的不良影响. 锁模脉冲中心波长 1053.6 nm, 3 dB 带宽 10.84 nm, 脉冲能量 3.2 nJ, 是目前单包层全光纤 Yb^{3+} 锁模激光器直接输出的最大脉冲能量. 输出脉宽为皮秒量级, 经腔外光栅对压缩后, 脉冲宽度为 188 fs, 接近变换极限脉宽. 激光器实现了十分稳定的连续锁模运行和开机自启动功能, 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 Yb^{3+} 全光纤环形腔主要由一段高掺杂浓度 Yb^{3+} 光纤、在线偏振器 (ILP)、偏振无关光隔离器 (ISO)、光谱滤波器 (SF)、两个偏振控制器 PC1 和 PC2、980 nm/1053 nm WDM、输出耦合器 (coupler) 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 . 激光器腔长为 12.2 m, 对应的脉冲重复频率和群速色散值分别为 16.45 MHz 和 0.274 ps^2 . 抽运源是一台输出波长为 980 nm 的二极管激光器, 最大输出功率为 410 mW, 抽运光经 980 nm/1053 nm WDM 耦合进入 Yb^{3+} 光纤. 激光器采用较高掺杂浓度 (对 979 nm 光的吸收率为 975 dB/m) 的 Yb^{3+} 光纤作为增益介质, 增益光纤长度为 33 cm. 为了充分提取腔内能量, 增加输出功率^[11], 在增益光纤之后熔接耦合器作为激光器输出端. 经分析, 实验中采用 20% 作为输出耦合比. 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^[12,13]. 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.

实验中采用 SF 的透过率曲线如图 2 所示. 透过率值在 1057 nm 最大, 在 1042 和 1064 nm 分别开始迅速下降. 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, 从而产生新的脉冲自振幅调制^[14]. 在 NPE 脉冲自振幅调制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. 因为 SF 以及导致脉冲啁啾的自相位调制 (SPM) 和 GVD 受温度变化及机械应变的影响很小, 当出现温度变化或机械应变严重影响 NPE 稳定工作时, SF 仍能提供稳定的脉冲振幅调制来维持锁模的正常运行. 所以, 两种锁模机理的共同作用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. 如石英光纤中 Yb^{3+} 离子的发射截面图所示 (图 3), Yb^{3+} 离子在 1030 nm 存在很强的发射峰, 具有比 1053 nm 波段大得多的发射截面^[15]. 如果不对其加以抑制, 则 1030 nm 光很容易在腔内自激起振, 吃空反转粒子数, 影响激光器的正常运行. 所以, 除了产生脉冲自振幅调制, 加强锁模机理外, SF 的另一重要作用是抑制 Yb^{3+} 离子在 1030 nm 的强发射峰, 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.

光纤激光器中, 限制脉冲能量的主要因素是光纤非线性效应引起的波分裂及 NPE 过驱动^[12]. 对于全光纤 Yb^{3+} 锁模激光器, 较大的正常腔 GVD 可以使大能量脉冲在腔内各部分始终保持频率啁啾的单调性 (正啁啾), 抑制了波分裂的发生^[16]. 因此, NPE 的过驱动成了限制脉冲能量的主要因素. 为了抑制过驱动, 增加可输出脉冲能量, 需减弱 NPE 的脉冲振幅调制作用^[17]. 实验中, 大的 GVD 使脉冲大幅展宽, 峰值功率降低, 同时, 在增益光纤后采用耦合器作为激光器输出也一定程度减小了腔内光纤中的脉冲能量及峰值功率. 峰值功率的下降降低了脉冲的非线性相移, 从而减弱了 NPE 的振幅调制作用. 通过调节 PC2 可以控制脉冲不同部分的非线性偏振旋转量, 也可以使 NPE 的振幅调制作用减弱. 减弱了的 NPE 往往无法单独提供足够强的脉冲振幅调制来保证激光器的锁模自启动^[17], 所以对于 NPE 作为等效可饱和吸收体单独锁模的情况, 抑制 NPE 过驱动和实现锁模自启动是矛盾对立的两个方面^[12]. 为了在脉冲能量较大时, 激光器能够有效避免 NPE 过驱动并同时实现锁模的自启动, 一个附加的脉冲振幅调制作用成为必须^[17]. 实验中, 通过 SF 对啁啾脉冲进行光谱滤波来产生这样一个附加的脉冲振幅调制^[14]. 正是这一附加的脉冲振幅调制与 NPE 相结合, 实现了激光器的锁模自启动和高稳定运行, 并有效抑制了 NPE 过驱动, 增加了可稳定锁模的脉冲能量.

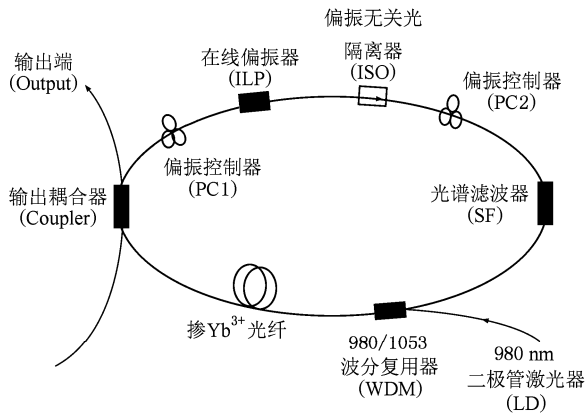
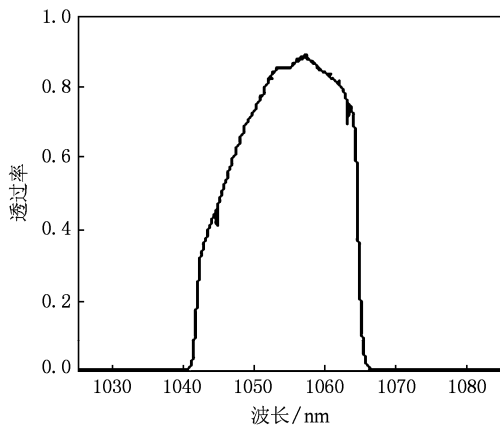
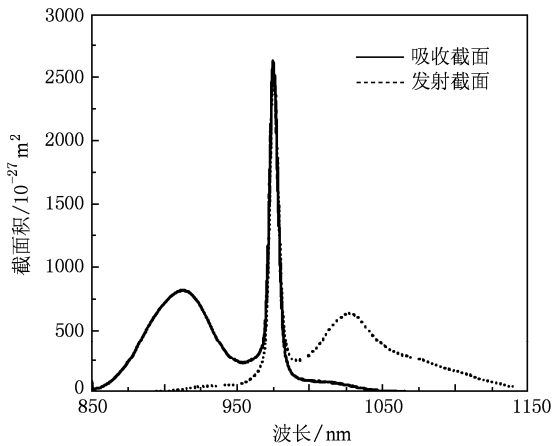
图1 掺Yb³⁺全光纤环形激光器装置图

图2 光谱滤波器的透过率曲线图

图3 石英光纤中Yb³⁺离子的吸收截面(实线)和发射截面(虚线)图

2.2. 锁模原理及分析

激光器主要通过 NPE 和 SF 共同作用实现锁模。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,再结合脉冲自振幅调制作

用,在腔内经过数百次循环后,最终达到稳态,实现锁模输出。激光器中脉冲的自振幅调制主要通过 NPE 和 SF 共同产生,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部分经历更多的相移,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脉冲的自振幅调制,从而形成等效快可饱和吸收体。同时,光纤中 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^[18]。通过 SF 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,使脉冲再次得到压缩,产生新的自振幅调制。

为了研究锁模脉冲的形成机理,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^[18, 19] (NLS)来描述

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

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, r 分别为光纤群速度色散系数和光克尔非线性系数。

NPE 的等效可饱和吸收效应表示为^[20]

$$T_{\text{NPE}} = 1 - B/(1 + P_1/P_{\text{SAT}}), \quad (2)$$

式中, T_{NPE} 为脉冲瞬时透过率, P_1 为脉冲的瞬时功率, P_{SAT} 和 B 分别为等效可饱和吸收效应的饱和功率和非饱和损耗,实验中主要通过改变偏振控制器 PC1, PC2 的状态加以调节。选取不同的 P_{SAT} 值,会引起锁模输出光谱的细微差别,但不影响光谱的基本特征^[20]。所以,为了更好地理解锁模脉冲的形成过程,在此不考虑 NPE 细节问题带来的影响,取 P_{SAT} 为当前脉冲峰值功率。

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

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2}$$

$$= [ir |A(z, t)|^2 + g(E_{\text{pulse}})] A(z, t), \quad (3)$$

$g(E_{\text{pulse}})$ 为光纤增益系数^[21, 22]

$$g(E_{\text{pulse}}) = \frac{g_0}{1 + \frac{1}{P_{\text{sat}} \times t_a} \int_{-\frac{1}{2}t_a}^{\frac{1}{2}t_a} |A(z, t)|^2 dt}, \quad (4)$$

其中, g_0 为小信号增益系数, 由 Yb^{3+} 光纤掺杂浓度及注入抽运功率共同决定^[21], t_a 是脉冲在腔内传输一周所需时间, P_{sat} 是增益饱和功率^[13]

$$P_{\text{sat}} = h\nu S / \sigma\tau, \quad (5)$$

式中 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 Yb^{3+} 离子发射截面积和上能级寿命.

根据激光器的组成结构, 模拟计算中 SF 引起脉冲自振幅调制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 SF 透过率函数由实验直接测定(图 2). 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: $\sigma = 0.34 \text{ (pm)}^2$ ^[15], $\tau = 0.8 \text{ ms}$ ^[15], $\beta_2 = 23 \text{ ps}^2/\text{km}$ ^[23], $r = 0.0047 \text{ (W} \cdot \text{m)}^{-1}$ ^[23], $B = 0.3$ ^[23], $g_0 = 30 \text{ dB}$ ^[23].

采用分步傅里叶法对方程(1), (3)数值求解. 并依次引入方程(1), 方程(2), ISO 插入损耗, SF, 方程(3), 输出耦合损耗的作用来描述脉冲在腔内一周的变化过程, 如此反复循环直到输出脉冲达到稳态. 图 4 为激光器自启动过程脉冲演化曲线图, 图 5 为脉冲幅度演化图. 从图 4 和图 5 可以清楚地看出脉冲的演化过程: 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, SF 开始发挥作用, 脉冲一部分能量被 SF 阻挡, 引起损耗的增加. 同时, NPE 引起的脉冲自振幅调制也开始增强, 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, 脉冲的减小速度也逐渐缓慢, 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. 图 6 为锁模状态下激光器不同位置处的脉冲光谱图. 可以看出, 经 SF 滤波之后的脉冲频谱(虚线)相比滤波之前的脉冲频谱(点线)明显变窄, 表明 SF 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)具有陡峭的边缘, 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 SF 共同作用产生, 是 SF 实现自启动锁模的典型特征之一^[14].

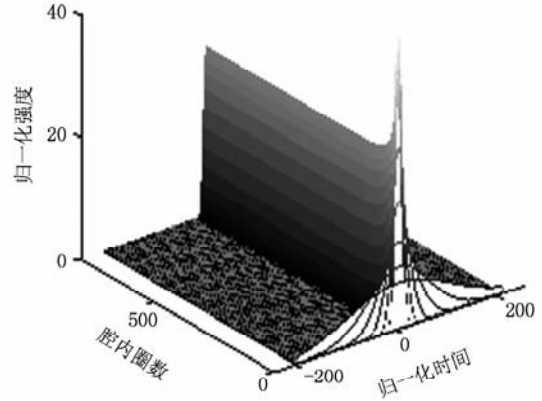


图 4 被动锁模光纤环形激光器脉冲演化图

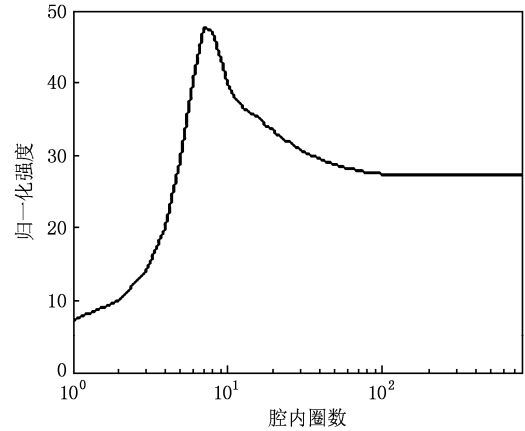


图 5 脉冲幅度演化图

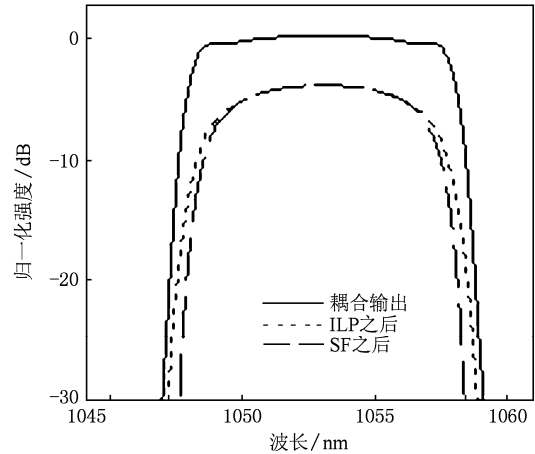


图 6 锁模激光器不同位置处的光谱图 实线为激光器输出端锁模脉冲光谱图, 点线为通过 ILP 之后的脉冲光谱图, 虚线为通过 SF 之后的脉冲光谱图

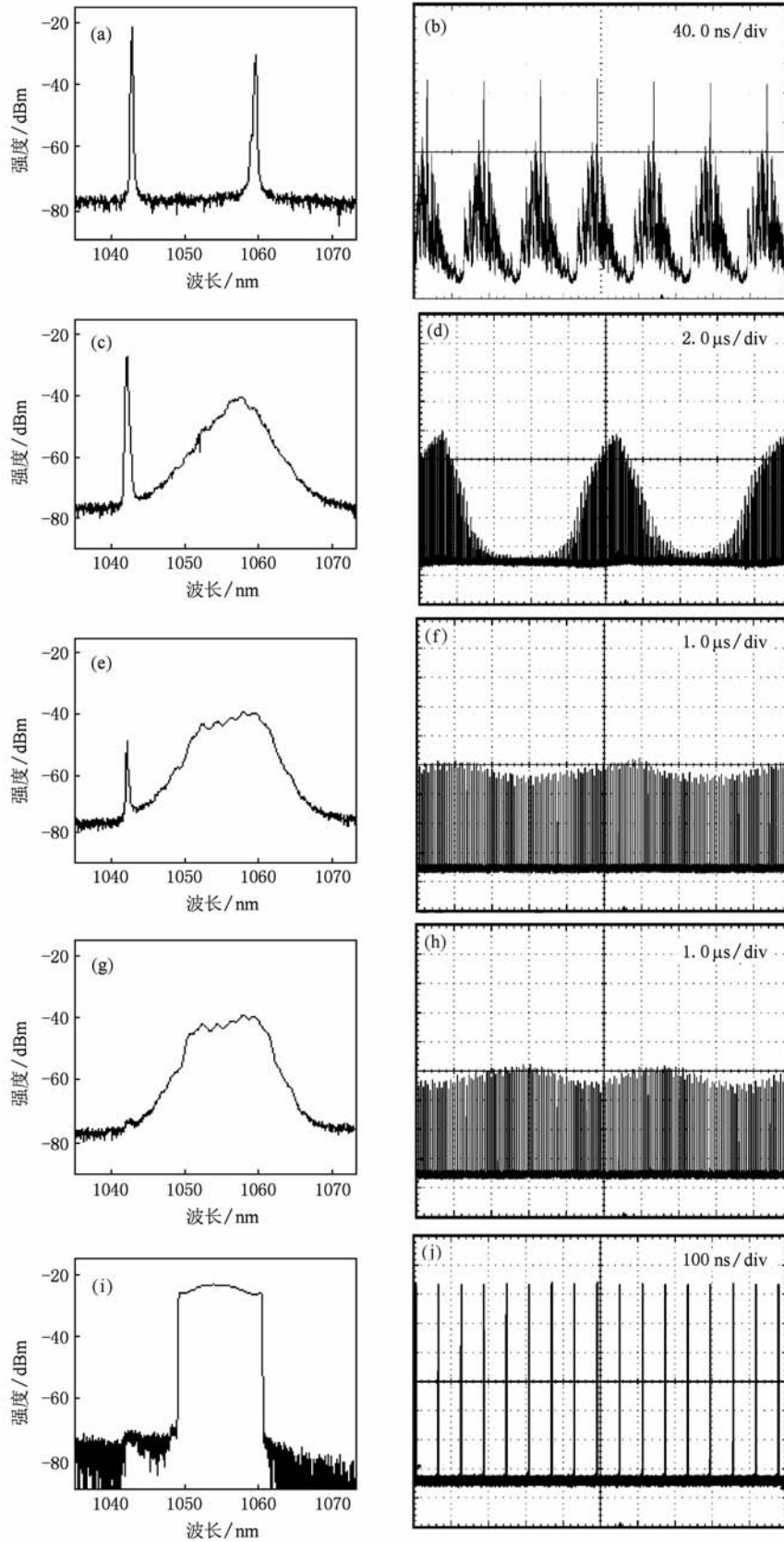


图7 不同输入抽运功率时激光器的输出频谱和对应的脉冲序列图 (a) 抽运功率 200 mW 时的输出频谱图, (b) 对应的脉冲序列图, (c) 抽运功率 230 mW 时的输出频谱图, (d) 对应的脉冲序列图, (e) 抽运功率 250 mW 时的输出频谱图, (f) 对应的脉冲序列图, (g) 抽运功率 270 mW 时的输出频谱图, (h) 对应的脉冲序列图, (i) 抽运功率 340 mW 时的锁模脉冲频谱图, (j) 对应的锁模脉冲序列图

3. 实验结果及分析

调节偏振控制器 PC1, PC2 至合适位置, 通过改变抽运功率可分别得到连续、调 Q、调 Q 锁模、连续锁模四种输出状态. 增加抽运功率至 170 mW 时, 激光器从连续激光输出变为调 Q 输出. 对应的光谱分布及脉冲序列如图 7 (a), (b) 所示. 从光谱图可以看出, 1042 nm 具有很强的自激振荡, 所含能量远远高于 1053 nm 附近的调 Q 激光. 这是因为 Yb^{3+} 离子的发射截面积从 1030 nm 向长波长逐渐递减, 虽然 Yb^{3+} 离子在 1030 nm 的强发射峰被 SF 抑制掉, 但在 SF 通带的截止短波长 (1042 nm) 仍然存在相对较强的发射能力. 1042 nm 强激光的存在, 恰恰证明了 SF 在抑制 1030 nm 强自激振荡中发挥的重要作用.

继续增加抽运能量至 220 mW, 激光器开始出现调 Q 锁模, 图 7 (c), (d) 为抽运功率 230 mW 时的输出光谱图和脉冲序列图. 如光谱图所示, 1042 nm 的自激振荡仍然很强. 图 7 (e), (f) 和图 7 (g), (h) 分别为抽运功率 250 和 270 mW 时对应的输出光谱及脉冲序列图. 可明显看出, 随着抽运功率的进一步增加, 1042 nm 自激振荡逐渐减弱直至基本消失. 这是因为抽运功率开始接近锁模阈值, 1053 nm 激光损耗减小, 发射增强, 锁模开始占据优势并消耗大部分上转换粒子的缘故. 同时, 随着抽运功率的增加, 调 Q 现象减弱, 脉冲振幅的波动幅度及波动周期逐渐减小, 脉冲序列趋向于稳定状态.

抽运功率增加至 300 mW 时, 激光器进入稳定的连续锁模状态. 如图 7 (i) 所示, 实际输出锁模脉冲光谱与计算结果基本符合, 具有 SF 实现自启动锁模的典型特征: 具有陡峭的边缘并在边缘附近存在小尖峰. 输出光谱中心波长为 1053.6 nm, 3 dB 带宽为 10.84 nm, 无象征多脉冲运行的现象存在. 锁模脉冲序列通过高速光电探测器 (SD43, 8 GHz 带宽) 和高分辨率 (12 GHz) 示波器观测 (如图 7 (j)), 脉冲间隔为 60.8 ns, 与 16.45 MHz 的重复频率对应, 符合锁模的基本原理^[18].

实现锁模以后, 继续增加抽运功率, 激光器始终保持稳定的连续锁模. 输出平均功率随抽运功率的变化情况如图 8 所示, 平均斜率效率为 18.3%, 输入抽运功率 410 mW (抽运光源的最大输出功率) 时, 激光器输出平均功率 53.07 mW, 对应脉冲能量

3.2 nJ. 无增益饱和及多脉冲现象出现, 可见脉冲能量受到抽运激光器最大输出功率的限制, 采用更高功率的二极管激光器作为抽运源有望获得更高的脉冲能量.

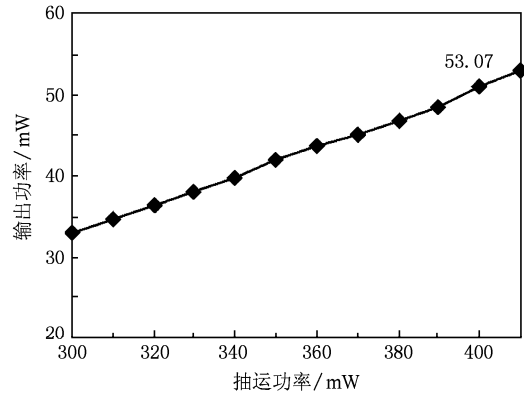


图 8 激光器输出平均功率随抽运功率的变化图

用带宽 8 GHz 的光电探测器 (SD43) 结合 12 GHz 的数字示波器测得锁模脉冲半宽度 (FWHM) 为 50 ps, 受光电探测器响应速度的限制, 可测得脉冲最窄宽度为 50 ps, 因此实际脉冲宽度应在皮秒量级且小于 50 ps. 图 9 是根据脉冲光谱得到的变换极限脉冲理论波形, 由于光谱中陡峭的边缘, 脉冲存在一定的旁瓣, 但旁瓣带走的能量很小, 不到脉冲能量的 5%. 实验中, 锁模脉冲在腔外经光栅对进行压缩, 并用自相关仪测量压缩后的脉冲宽度. 其自相关曲线如图 10 所示, 半高全宽为 292 fs, 对应 188 fs 的真实脉冲宽度. 图中旁瓣较理论计算结果明显增大, 这主要是由光栅对引入的高阶色散引起, 进一步补偿高阶色散, 有望得到更加理想的结果.

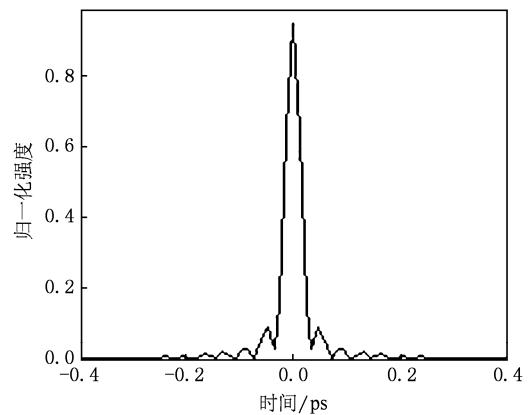


图 9 压缩后脉冲理论计算波形

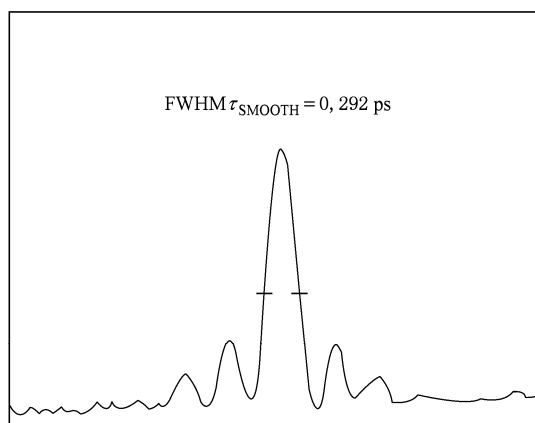


图10 实际压缩后脉冲自相关曲线图

激光器工作十分稳定,工作台的微小振动和 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内的环境温度变化不会影响激光器的锁模运行.对偏振控制器和抽运功率不进行任何调节,激光器在6个多小时的连续锁模运行中,输出平均

功率的波动范围小于1%,且输出光谱中心波长和光谱宽度的变化都在0.1 nm以内.在锁模运行状态下,直接关闭抽运源电源再重新开启,激光器可自动恢复到相同的锁模状态,输出功率、中心波长以及光谱宽度不发生变化.可见,激光器具有较高的运行稳定性并实现了方便的一键启动功能,在ICF激光驱动装置前端系统中具有重要的应用价值.

4. 结 论

利用NPE与SF相结合实现了全光纤掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器在1053 nm的自启动锁模,获得了中心波长为1053.6 nm,3 dB带宽10.84 nm,脉冲能量3.2 nJ的稳定锁模脉冲.脉冲在腔外被压缩至188 fs,接近变换极限脉宽.进一步对输出耦合比、SF带宽、全光纤环形腔长度进行优化,有望获得更高脉冲质量、更高能量、更稳定的锁模输出.

- [1] Dawson J W, Liao Z M, Jovanovic I, Wattellier B, Beach R, Payne S A, Barty C P J 2003 UCRL-JC-152561
- [2] Dawson J W, Liao Z M, Mitchell S, Messerly M, Beach R, Jovanovic I, Brown C, Payne S, Barty C P J 2005 SPIE **5709** 37
- [3] Huang X J, Liu Y Z, Sui Z, Li M Z, Li X, Lin H H, Wang J J 2006 Acta Phys. Sin. **55** 1191 (in Chinese) [黄绣江、刘永智、隋展、李明中、李忻、林宏兔、王建军 2006 物理学报 **55** 1191]
- [4] 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]
- [5] Lin H H, Lu Z H, Wang J J, Zhang Y, Wang F R, Xu D P, Zhang R, Li M Z, Deng Q H, Luo Y M, Tang J, Ding L 2008 Acta Phys. Sin. **57** 5646 (in Chinese) [林宏兔、卢振华、王建军、张颖、王凤蕊、许党朋、张锐、李明中、邓青华、罗亦鸣、唐军、丁磊 2008 物理学报 **57** 5646]
- [6] Lin H H, Sui Z, Li M Z, Wang J J 2006 High Power Laser and Particle Beams **18** 825 (in Chinese) [林宏兔、隋展、李明中、王建军 2006 强激光与粒子束 **18** 825]
- [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] Luo Z C, Xu W C, Song C X, Luo A P, Chen W C 2009 Chin. Phys. B **18** 1674
- [11] Bale B G, Kutz J N, Chong A, Renninger W H, Wise F W 2008 J. Opt. Soc. Am. B **25** 1763
- [12] Ilday F Ö, Buckley J R, Lim H, Wise F W, Clark W G 2003 Opt. Lett. **28** 1365
- [13] Komarov A, Leblond H, Sanchez F 2005 Phys. Rev. A **71** 053809
- [14] Chong A, Buckley J, Renninger W, Wise F 2006 Opt. Express **14** 10095
- [15] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, Hanna D C 1997 IEEE Journal of Quantum Electronics **33** 1049
- [16] Anderson D, Desaix M, Lisak M, Quiroga-Teixeiro M L 1992 J. Opt. Soc. Am. B **9** 1358
- [17] Buckley J, Chong A, Zhou S, Renninger W, Wise F W 2007 J. Opt. Soc. Am. B **24** 1803
- [18] Agrawal G P (Translated by Jia D F et al) 2002 Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp26—31, pp64—71, pp132—140 (in Chinese) [Agrawal G P 著贾东方等译 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]
- [19] Lei T, Tu C H, Li E B, Li Y N, Guo W G, Wei D, Zhu H, Lü F Y 2007 Acta Phys. Sin. **56** 2769 (in Chinese) [雷霆、涂成厚、李恩邦、李勇男、郭文刚、魏岱、朱辉、吕福云 2007 物理学报 **56** 2769]
- [20] Chong A, Renninger W H, Wise F W 2008 J. Opt. Soc. Am. **25** 140
- [21] 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]

[22] Liu H G, Hu M L, Song Y J, Li Y F, Chai L, Wang C Y 2010
Chin. Phys. B **19** 014215

[23] Ilday F Ö, Buckley J R, Clark W G, Wise F W 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 213902

All-fiber ultrashort Yb^{3+} doped fiber laser self-started by spectral filter

Zhang Pan-Zheng[†] Fan Wei Wang Xiao-Chao Lin Zun-Qi

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

(Received 15 November 2009; revised manuscript received 27 April 2010)

Abstract

Theory of the passively mode-locked Yb^{3+} doped fiber ring laser self-starting through spectral filter is presented. The all-fiber Yb^{3+} doped fiber ring laser generating ultrashort pulses are designed and fabricated. High concentration Yb^{3+} doped fiber was employed as gain medium, which was pumped by a 980 nm diode laser. In the all-normal-dispersion cavity, a spectral filter was spliced to reduce the large emission peak at 1030 nm of Yb^{3+} ion and to generate an additional pulse shaping through spectral filtering of chirped pulse. Self-starting and stable mode-locking centered at 1053 nm was achieved by nonlinear polarization evolution along with spectral filtering from the filter. The mode-locking threshold was 300 mW, with the slope efficiency of 18.3%, the maximum output power was 53.07 mW, corresponding to the maximum pulse energy of 3.2 nJ. The center wavelength of the mode-locked pulse was 1053.6 nm, with 3 dB bandwidth of 10.84 nm at the repetition rate of 16.45 MHz. The picosecond mode-locked pulse can be dechirped to 188 fs using grating pair outside the cavity.

Keywords: Yb^{3+} doped fiber laser, self-starting mode locking, all-fiber laser

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc

[†] E-mail: nwpuzhangpanzheng@yahoo.cn