

文章编号: 0253-2239(2009)08-2243-05

大模场面积光子晶体光纤激光器展宽脉冲锁模域的束缚态运转

张 鑫 胡明列 宋有建 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 实验研究了大模面积光子晶体光纤飞秒激光器在近零色散点展宽脉冲锁模的束缚态运转。获得了双脉冲束缚态锁模, 以及脉冲间隔不相等的多脉冲束缚态锁模, 实验发现束缚态的子脉冲间距具有随机性。通过建立光纤锁模激光器的数值模型, 分析了激光器束缚态锁模建立的动力学过程, 在一定抽运强度下, 激光器存在多个稳态, 或者单脉冲运转, 或者子脉冲间隔不相等的束缚态运转, 这取决于锁模建立阶段半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 对噪声信号的随机提取。并提出了抑制束缚态的方法, 模拟得出此项技术可直接获得的最大单脉冲能量为 19.6 nJ, 考虑到 40% 左右的压缩损耗, 可得到压缩至 76 fs 的最短脉冲, 单脉冲能量为 11.8 nJ。数值模拟结果能很好的与实验相符合。

关键词 光纤光学; 大模场面积光子晶体光纤; 飞秒激光; 展宽脉冲锁模光纤激光器; 束缚态

中图分类号 TN248.3⁺5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2243

Bound State Operations in Stretched-Pulse Mode-Locking Large-Mode-Area Photonic-Crystal-Fiber Laser

Zhang Xin Hu Minglie Song Youjian Chai Lu Wang Qingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, College 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 Bound states in a stretched-pulse large-mode-area photonic crystal fiber mode-locking laser operating in the vicinity of zero dispersion regime is demonstrated, where the double pulse and multi-pulse bound state mode-locking are obtained. The experiment shows that the separation between sub-pulses is unequal with some randomness. A numerical model of the mode-locked fiber laser is established and the simulations show that the laser can operate either with single-pulse or with multi-pulse in a certain pump power range depending on semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), which selects signal randomly from noise. And the characteristic of the multi-pulse bound states and randomness of the distance between sub-pulses are researched. The results can be used to enhance the single pulse energy, which indicated that the highest pulse energy of 19.6 nJ can be obtained with a compressed pulse duration of 76 fs and a reduced pulse energy of 11.8 nJ due to about 40% compression loss. The numerical simulation agrees well with the experiment.

Key words fiber optics; large-mode-area photonic crystal fiber; femtosecond laser; stretched-pulse mode-locked fiber laser; bound states

收稿日期: 2008-10-10; 收到修改稿日期: 2008-11-28

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z447)、国家自然科学基金(60678012, 60838004)、国家 973 计划(2006CB806002)、全国博士学位论文作者专项资金(2007B34)、教育部科学技术研究重点项目(108032)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

作者简介: 张 鑫(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率飞秒激光技术的理论和实验等方面的研究。

E-mail: zhangxin@tju.edu.cn

导师简介: 胡明列(1978—), 男, 副教授, 主要从事超短脉冲激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: huminglie@tju.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

锁模光纤激光器因其低成本、结构简单、环境稳定性好等优点,吸引了众多研究机构的广泛关注。许多领域的应用需要其产生更大能量、更窄脉宽的飞秒脉冲。传统光纤激光器受限于纤芯面积的太小而无法支持太高能量的激光脉冲。新型掺 Yb 大模场面积光子晶体光纤^[1~3]因其极大的有效模面积^[4]和很高的抽运光数值孔径,成为获得更大能量超短脉冲的希望。2007 年在德国实现了基于这种光纤的孤子锁模激光器,输出的单脉冲能量达 16 nJ^[5]。随后又实现了正色散锁模输出,获得的单脉冲达 256 nJ,经腔外光栅对色散补偿,脉冲宽度压缩到 400 fs^[6]。本课题组也同步开展了相关研究^[7~9],利用偏振型大模场面积光子晶体光纤实现了不同色散区的锁模,在正色散锁模区获得 50 nJ 的高单脉冲能量,在展宽脉冲锁模区获得 98 fs 的超短脉冲。

当前该类激光器的研究集中在如何能够输出更高量级的单脉冲能量,然而在更高强度抽运下,这类激光器与传统光纤飞秒激光器同样容易导致多脉冲锁模运转^[10,11]。稳定的多脉冲主要以两种形式存在,脉冲周期性地分布在腔内的谐波锁模和脉冲间存在固定相位关系的束缚态锁模^[12,13]。研究表明激光器的峰值功率限制效应导致多脉冲,并且每个子脉冲的能量相等^[14],而子脉冲数大于两个的束缚态,其子脉冲间距可以不相等^[15]。对多脉冲的产生机制和特性进行深入研究,一方面有助于抑制多脉冲而获得大能量单脉冲,另一方面有助于利用多脉冲以实现其他用途(例如在相同腔长下提高重复频率)。

本文报道了在实验中获得此类激光器的束缚态运转,并数值模拟了大模场面积光子晶体光纤飞秒激光器在近零色散点附近的呼吸锁模动力学过程,结果说明在一定的抽运强度范围内,激光器或者以单脉冲运转,或者以多脉冲运转,这取决于锁模建立过程中可饱和吸收体对噪声信号的随机提取。进一步详细分析了多脉冲束缚态的特点,子脉冲间距的随机性。数值模拟很好地符合实验结果。由此给出了低抽运强度下自启动锁模,缓慢提高抽运获得大能量单脉冲的实用技术。

2 实 验

实验装置与文献[4]相同。采用线性腔结构,掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤作为激光增益介质。大功率激光二极管输出的波长为 976 nm 的

激光作为抽运光。利用对波长为 976 nm 的抽运光高透,对波长为 1.04 μm 的激光高反的双色镜分离激光与抽运光。用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 启动锁模,利用焦距为 11 mm 的非球面透镜聚焦,通过改变会聚光斑的尺寸大小来获得启动锁模所需的饱和能量密度。利用一对 600 line/nm 的表面镀金的闪耀光栅作为色散补偿,通过调整光栅对的间距改变反常色散量。利用另一对半波片和偏振分束器调整激光器的耦合输出率,偏振分束器的导出端作为激光器的输出。

通过光栅对的距离调节腔的净色散约为 -0.006 ps^2 ,此时激光器运转在呼吸锁模状态。较低抽运功率下得到的结果与文献[4]的实验结果是基本吻合的,平均功率为 400 mW,重复频率为 47 MHz(对应于 8.5 nJ 的单脉冲能量),脉冲宽度为 500 fs 的稳定的锁模脉冲输出,经腔外色散补偿,脉冲压缩至 98 fs。然而当抽运功率加大时,激光器开始运转在双脉冲束缚态,图 1 所示为激光器的典型双脉冲束缚态的自相关曲线和光谱,子脉冲相距约 2 ps。继续增加抽运功率,激光器容易运转在多脉冲束缚态,典型情况如图 2 所示。图 2(a)为三脉冲束缚态,第一个脉冲与第二个脉冲相距约 2.3 ps,第二个脉冲与第三个脉冲相距约 2.6 ps;图 2(b)为四脉冲束缚态,第一个脉冲与第二个脉冲相距约 1.8 ps,第二个脉冲与第三个脉冲相距约 2.1 ps,第三个脉冲与第四个脉冲相距约 2.6 ps。还需指出,降低抽运功率直到重新得到单脉冲锁模,再将抽运功率增加到原来束缚态时的水平,此时发现束缚态子脉冲的间距与原来不同,反复实验的结果发现这种束缚态锁模下的子脉冲间距是随机的,下面数值模拟将给出详细解释。

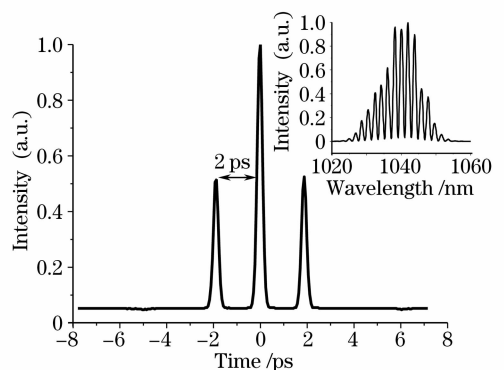


图 1 双脉冲束缚态的自相关曲线,插图为对应的光谱图
Fig. 1 Autocorrelation trace of the two-pulse bound states, the inset shows the corresponding laser spectrum

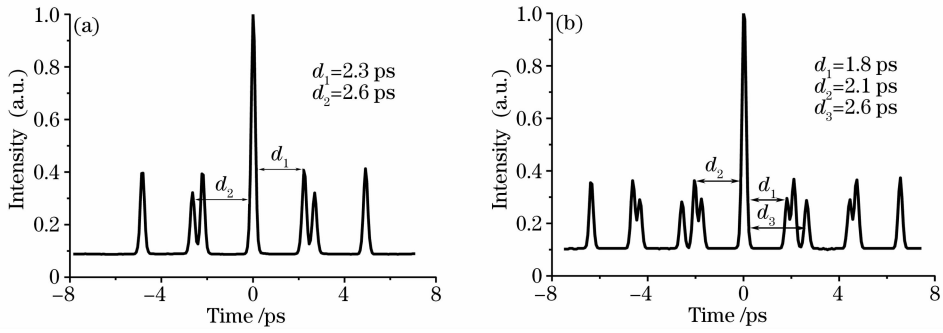


图 2 三脉冲和四脉冲束缚态的自相关曲线

Fig. 2 Autocorrelation traces of the three-pulse and four-pulse bound states

3 数学模型

计算模型采用分布傅里叶法求解基本方程

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{g}{2}A - \frac{i}{2}(\beta_2 + igT_2^2) \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma|A|^2A, \quad (1)$$

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 为群速度延迟, 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, g 为增益系数。按照激光腔的结构设定各项参数, 信号按顺序完全经过各个器件为一个周期, 通过循环计算信号经过有限个周期演化达到稳定自治, 实现对激光器锁模运转的数值模拟。由于偏振型大模场面积光子晶体光纤锁模激光器在腔内只存在一个线偏振态, 所以该模型采取的标量算法是合理的。数值模拟中以随机高斯噪声为初始信号, 与实际锁模建立过程相符。模拟结果经过设置更大的时间窗口、频率窗口, 以及更高的时间分辨率、频率分辨率的计算, 并通过增加循环周期的方法检验, 验证结果的稳定性和可靠性。

依据线型腔大模场面积光子晶体光纤锁模激光器的结构建立模拟腔型, 如图 3 所示。光信号经过增益光子晶体光纤放大后, 耦合输出为 95%, 剩余光又经过 SESAM 的非线性反射回到增益光子晶体光纤再次放大, 然后通过光栅对补偿色散, 重新耦合回光纤, 设此处耦合损耗为 40%, 上述过程完成一次腔内循环。模拟中所用参数完全按照实验中各个器件的实际值设定。其中增益光纤长度设为 $L = 1.5$ m, 非线性系数 $\gamma = 0.00026$ W⁻¹/m, 二阶色散 $\beta_2 = 0.02$ ps²/m, 极化弛豫时间 $T_2 = 0.025$ ps (由设定中心波长 1030 nm, 抛物线型增益半宽度 22 nm 得出)。模拟中考虑了单向抽运造成的增益沿光纤长度非线性下降, 同时考虑了增益饱和和效应, 增益系

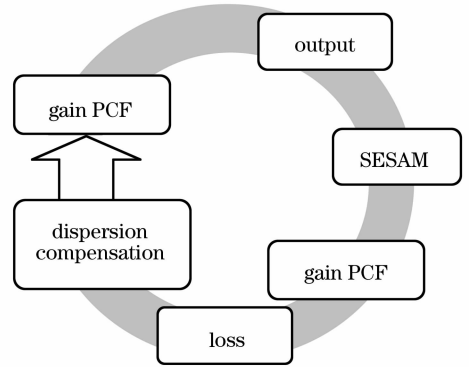


图 3 激光器腔内元件模拟结构图

Fig. 3 Illustration of the fiber laser cavity elements used for the simulations

数为

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

式中 g_s 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。综合两种效应, 模拟中设定小信号增益沿光纤长度成指数下降, 光纤饱和和能量设为 1 nJ。

SESAM 的线性吸收率为 $S_{\text{loss}} = 65\%$, 调制深度为 $\Delta R = 35\%$, 吸收恢复时间为 $T_r = 0.5$ ps, 饱和能量设为 $E_{\text{sat}} = 0.1$ nJ, 实验中饱和能量由透镜聚焦位置调节。SESAM 的非线性强度反射率为 $R(t)$ 可表示为

$$R(t) = \exp[-2q(t)] - (S_{\text{loss}} - \Delta R), \quad (3)$$

其中 $\frac{dq(t)}{dt} = -\frac{q(t) - q_0}{T_r} - \frac{q(t)P(t)}{E_{\text{sat}}}$,

$$q_0 = -\frac{1}{2} \lg(1 - \Delta R).$$

4 模 拟

经过光栅对 4 次反射提供色散量为 $\beta_2^c =$

-0.066 ps^2 , 此时腔内总色散量为 $\beta_2^{\text{net}} = \beta_2^c + \beta_2^{\text{PCF}} \times 2L = -0.006 \text{ ps}^2$, 激光器运转在近零色散点的展宽脉冲锁模区。腔内增益大于损耗时, 激光器开始连续运转并伴有随机噪声信号, 其中较大的随机噪声脉冲被半导体可饱和吸收镜提取, 使其增益大于腔的平均增益, 并且可饱和吸收作用使得被提取的噪声脉冲中心增益大于两沿增益, 脉冲能量不断放大、脉宽不断窄化, 导致非线性效应越来越显著, 在腔的负色散的共同作用下, 脉冲向孤子演化。又由于受到增益的限制, 最大的噪声信号增长最快, 演化成孤子, 较小的噪声信号在增益竞争中逐渐被损耗掉。模拟计算在适当抽运强度下, 获得稳定锁模运转, 单脉冲能量 8.3 nJ , 谱宽 16.3 nm , 直接输出脉宽 547 fs , 经过色散补偿可压缩至 96 fs , 与文献[4]中报道的实验结果是基本吻合的。

增大抽运功率, 以同样的随机高斯噪声作为初始信号, 在相同参数下多次重复模拟可以得到不同的稳定状态, 即激光器或者运转在单脉冲状态, 或者运转在多脉冲状态。图 4 为典型的运算结果, 其中

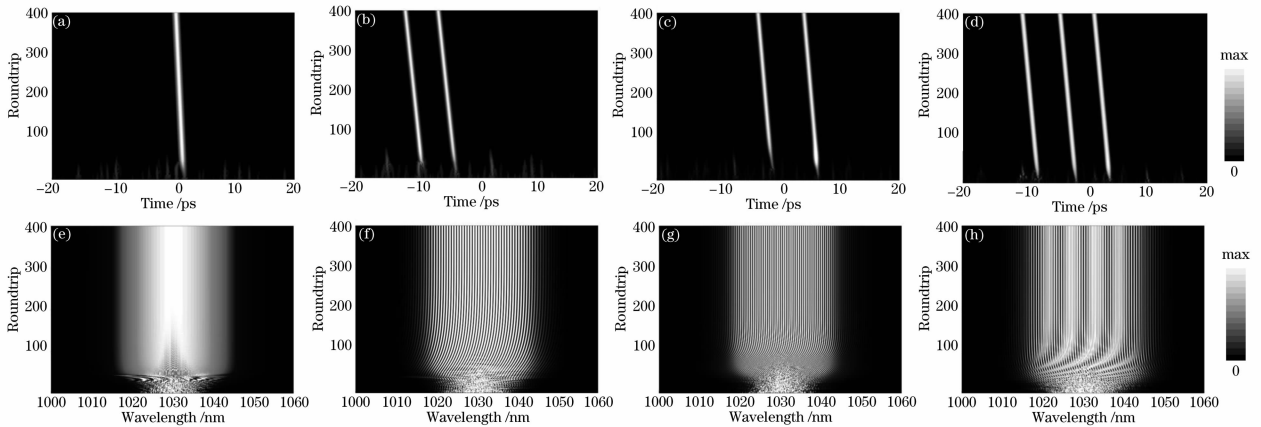


图 4 (a), (b), (c) 为相同抽运强度下单脉冲与双脉冲锁模建立过程图, (d) 为更高抽运强度下三脉冲锁模建立过程图, (e), (f), (g), (h) 为对应的光谱演化过程

Fig. 4 (a), (b), (c) Mode-locking building processes of one and two sub-pulses in the same pump power, (d) mode-locking building process of three sub-pulses in a higher pump power, (e), (f), (g), (h) building process of the corresponding laser spectrum

从图 4 可以得出, 每次循环脉冲在时域上都有一个相对的延迟, 这是由于 SESAM 的恢复时间为 0.5 ps , 相对此脉冲起慢可饱和吸收体作用, 对脉冲前沿的吸收远大于后沿的吸收, 导致脉冲时域和频域的不对称, 进而导致在腔内演化中脉冲的压缩和展宽不对称, 使脉冲峰值位置发生脉冲内移动。图 5 为图 4(a) 中锁模稳定后第 400 次循环的腔内脉冲自洽演化过程(为了更清晰表示激光腔内脉冲的自洽演化过程, 在强度上选择了对数坐标), 从时域

图 4(a)~图 4(c) 为同样抽运强度下, 获得的不同的锁模状态: 图 4(a) 为单脉冲, 图 4(b)、图 4(c) 为双脉冲束缚态, 并且子脉冲的间距不相等。多次模拟发现子脉冲间距是随机的, 这与实验中多次启动锁模获得的结果相一致。随着抽运功率的进一步增加, 锁模越来越倾向于多脉冲, 图 4(d) 为抽运继续增强后的三脉冲状态, 并且子脉冲间隔不相等。这是由于 SESAM 对初始随机噪声的随机提取所致。若初始时 SESAM 能提取一个大的噪声信号, 此信号的迅速放大就会抑制其他噪声的放大, 激光器很快就会稳定在单脉冲锁模状态; 若初始时 SESAM 同时提取出几个较大的噪声信号, 这些信号都很快被放大, 由于增益竞争, 最终会有少数几个能量接近的脉冲发展成多脉冲锁模状态。图 4(e)~图 4(h) 为对应光谱演化过程, 其中图 4(f)~图 4(h) 可以清楚看到束缚态子脉冲的光谱干涉, 图 4(f) 对应的子脉冲间距约 5 ps , 干涉条纹较疏, 图 4(g) 对应的子脉冲间距约 8 ps , 干涉条纹较密, 而图 4(h) 对应的是三脉冲束缚态, 可以看出有两套干涉条纹。

[图 5(a)] 和频域[图 5(b)] 都能看出腔内极其明显的脉冲压缩展宽-再压缩展宽过程。其中图 5(a) 中黑线为腔内不同位置脉冲峰值相对时间坐标的连线, 慢可饱和吸收体对脉冲前后沿的不同吸收效应导致脉冲的循环周期与腔长对应的循环周期之间有微小的偏移, 但锁模稳定后这个偏移每个周期都相等, 所以慢可饱和吸收体启动的锁模脉冲序列仍是等间隔的。

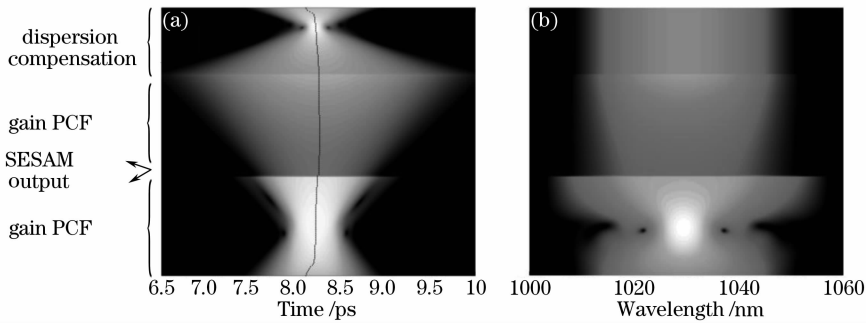


图 5 稳定的单脉冲锁模下腔内脉冲时域(a)和频域(b)压缩展宽自洽图

Fig. 5 Self consistent maps of the compression and stretching of stable the intra-cavity model-locked stretched pulse in

(a) time domain, (b) frequency domain

由上面模拟结果可知束缚态多脉冲的出现与初始噪声信号有关,为了尽可能抑制多脉冲的出现,进一步模拟了存在锁模脉冲的条件下,逐步提高抽运功率的锁模情况。模拟中采用较低抽运强度下得到的单脉冲(此条件下不会激发多脉冲),加入随机噪声作为高抽运强度下的初始信号。模拟结果发现随机噪声信号不会带来脉冲的分裂或者子脉冲的产生,最大能够得到稳定单脉冲的能量为 19.6 nJ, 谱宽 29.5 nm, 直接输出 978 fs, 在腔外光栅对提供 -0.018 ps^2 的色散的情况下,可最短压缩至 76 fs, 考虑到约 40% 的压缩损耗,脉冲能量减小为 11.8 nJ。再进一步提高抽运功率,则同样会发生脉冲分裂。这种方法相当于实验上在低功率锁模稳定后,缓慢增加抽运强度以抑制腔内噪声信号扰动,来获得大能量单脉冲的实用技术。同样高抽运强度下,如果以随机噪声作为初始信号,很难得到单脉冲的结果,这等效于实验中直接在高强度抽运下获得锁模。

5 结 论

实验获得了大模场面积光子晶体光纤激光器在近零色散点的展宽脉冲束缚态锁模运转,通过建立此种激光器的数值模型,用数值模拟方法分析了展宽脉冲锁模建立过程,研究了多脉冲束缚态的产生和特点,得出由于锁模建立过程中 SESAM 对初始噪声的随机提出导致了不同束缚态的结论。深入了解此种激光器束缚态锁模特性,有助于避免多脉冲束缚态来获得大能量单脉冲,以及更好地实现束缚态的其他应用。

参 考 文 献

1 J. Limpert, A. Liem, M. Reich *et al.*. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **12**(7): 1313~1319

2 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

3 Ni Yi, Peng Jiangde, Ke Yajie *et al.*. Single-mode photonic crystal fiber with a large core[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 901~903
倪屹,彭得江,柯亚杰等. 大芯区的单模光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 901~903

4 Libo Li, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. transverse-mode controlling of a large-mode-area multimode fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 524~526

5 B. Ortac, J. Limpert, A. Tünnermann. High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2149~2151

6 B. Ortac, O. Schmidt, T. Schreiber *et al.*. High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(17): 10725~10732

7 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Experimental research on high average power femtosecond large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1606
王清月,胡明列,宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1603~1606

8 Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. Stretched-pulse femtosecond photonic crystal fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 830~834
宋有建,胡明列,张弛等. 呼吸孤子锁模的光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 830~834

9 Song Youjian, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. High energy femtosecond Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser works in soliton regime [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6425~6429
宋有建,胡明列,刘博文等. 高能量掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤孤子锁模飞秒激光器[J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6425~6429

10 R. P. Davey, N. Langford, A. I. Ferguson. Interacting solitons in erbium fiber laser[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(14): 1257~1259

11 K. Tamura, H. A. Haus, E. P. Ippen. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fiber ring laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(24): 2226~2228

12 A. B. Grudinin, D. J. Richardson, D. N. Payne. Energy quantisation in figure eight fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(1): 67~68

13 Jian Wu, Hua Cai, Xiaohong Han *et al.*. Multi-pulse operation of a Kerr-lens mode-locked femtosecond laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 76~78

14 D. Y. Tang, L. M. Zhao, B. Zhao *et al.*. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72**(4): 043816

15 B. Ortac, A. Hideur, M. Brunel *et al.*. Generation of parabolic bound pulses from a Yb-fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 6075~6083