

高脉冲能量大模场面积光子晶体光纤飞秒激光器

宋有建, 胡明列*, 张弛, 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

* 联系人, E-mail: huminglie@tju.edu.cn

2007-12-29 收稿, 2008-05-26 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2003CB314904, 2006CB806002)、国家高技术研究发展计划(编号: 2007AA03Z447)、国家自然科学基金(批准号: 60678012)、高等学校博士学科点专项科研基金(编号: 20070056083, 20070056073)、教育部科学技术研究重点项目(编号: 108032)和教育部新世纪优秀人才支持计划(编号: NCET-07-0597)资助项目

摘要 报道了一种支持高单脉冲能量输出的被动锁模飞秒光纤激光器. 该激光器使用具有极低非线性系数的掺 Yb^{3+} 双包层大模场面积偏振光子晶体光纤作为激光增益介质, 具有很好的环境稳定性. 激光器基于线形腔结构, 没有色散补偿, 利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 实现自启动锁模, 获得了平均功率为 2.5 W, 重复频率为 51.4 MHz (对应于 50 nJ 的单脉冲能量), 脉冲宽度为 4.2 ps 的稳定的连续波锁模脉冲输出. 经腔外色散补偿, 脉冲宽度压缩至 410 fs. 当激光器输出功率比较低时, 脉冲成形由 SESAM 的非线性吸收决定, 而在高功率输出的情况下, 激光器的锁模运转主要取决于自相位调制展宽光谱与增益带宽的限制之间的平衡.

关键词

飞秒
光子晶体光纤
大模场面积光纤
光纤激光器

飞秒激光脉冲具有时间分辨率高、峰值功率高、光谱宽等特点, 其应用范围遍及光频标、时域分辨的化学研究、太赫兹产生等基础研究领域, 光学相干层析摄像、激光眼科手术等生物医学领域以及精密加工等工业领域. 固体锁模激光器是目前最成熟、应用最为广泛的飞秒光源, 最高峰值功率、最短脉冲宽度等输出指标的记录都由它保持. 但是由于固体激光器中大量使用分离器件以及光路在自由空间中传输, 使其操作复杂, 维护成本高, 且需要在苛刻的超净环境中使用, 极大限制了飞秒激光技术的普及化. 以掺稀土元素的光纤作为增益介质的锁模激光器可以由激光二极管(LD)直接抽运, 效率高, 结构紧凑, 价格低廉. 由于飞秒激光系统的光束完全被封闭在纤芯中, 不受周围环境的影响, 将飞秒激光器从超净、恒温 and 防震的高级实验室中解放出来. 且光纤具有很大的表面积-体积比, 具有极好的散热效果, 引入双包层抽运结构, 可以利用大功率LD直接抽运, 实现高功率光纤激光器. 传统光纤激光器在高功率下的锁模运转受到光纤非线性的限制. 大模场面积光子

晶体光纤通过在光纤包层中引入周期性排列的空气孔, 可以极大地提高光纤的纤芯直径并保持单模, 从而有效降低非线性^[1]. 最近, 国际上相继出现了基于掺 Yb^{3+} 双包层大模场面积光子晶体光纤的高能量锁模激光器的报道^[2~4], 其中的一篇基于棒状光子晶体光纤的全正色散域锁模的报道, 所选用光纤的纤芯直径达 70 μm , 内包层数值孔径达 0.6. 从激光器中直接输出单脉冲能量为 265 nJ, 重复频谱为 10.18 MHz 的锁模脉冲, 腔外压缩后脉冲宽度达 400 fs, 其技术指标已经能与固体飞秒激光器相比拟^[2].

超短脉冲光纤激光器具有如下几种锁模机制. 孤子锁模需要一段负色散的光纤, 锁模脉冲以孤子的形式存在于光纤中且在传输的过程中保持脉冲宽度不变. 由于孤子的产生需要色散和非线性的严格平衡, 孤子锁模激光器的单脉冲能量限制在 10 pJ 量级^[5]. 利用两段色散量相同, 色散符号相反的光纤可以实现呼吸孤子锁模^[6], 由于锁模脉冲在光纤中周期性的展宽和压缩, 有效降低了峰值功率, 其支持的单脉冲能量可以达到纳焦耳(nJ)量级. 激光脉冲在正

常色散光纤中的非线性演化支持自相似子^[7]的产生,自相似子具有抛物线型的脉冲形状和线性啁啾,有效避免脉冲分裂.这使得自相似锁模的光纤激光器支持的单脉冲能量比呼吸孤子锁模高一个数量级.如果超短脉冲带有强烈的啁啾,激光介质的有限增益带宽同样可以起到可饱和吸收的作用,从而使激光器在没有任何色散补偿机制的情况下实现超短脉冲运转,称光纤激光器工作于全正色散锁模域^[8].半导体可饱和吸收镜(SESAM)基于集成在半导体材料的布拉格反射镜之上具有可饱和吸收作用的单层量子阱薄层,提供依赖于光强的反射,被广泛用于固体激光器及光纤激光器的锁模.2004年的一篇报道中,Herda和Okhotnikov利用高调制深度的SESAM提供的非线性可饱和吸收实现了光纤激光器的全正色散域锁模^[9].

本文基于掺 Yb³⁺ 双包层大模场面积偏振光子晶体光纤,利用 SESAM 实现了全正色散域自启动锁模,获得平均功率为 2.5 W (单脉冲能量为 50 nJ),脉冲宽度为 4.2 ps 的锁模脉冲输出,经腔外色散补偿,脉宽达 410 fs.由于使用了偏振结构的光子晶体光纤,有效抑制了外部环境造成的随机双折射,使得激光器具有很好的环境稳定性.

1 掺 Yb³⁺ 双包层大模场面积偏振光子晶体光纤

实验中所用的掺 Yb³⁺ 双包层大模场面积偏振光子晶体光纤(Crystal Fibre A/S, 丹麦)的端面如图 1 所示.其纤芯的单模场直径为 29 μm (对应的单模场面积为 660 μm²),数值孔径为 0.03.内包层直径 200 μm,具有六角型周期性排布的空气孔.作为抽运纤芯的内包层之外环绕着一层“空气包层”,其相邻空气孔

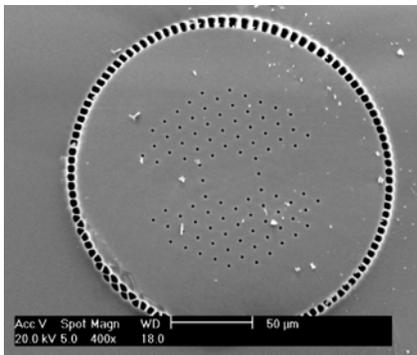


图 1 大模场面积光子晶体光纤端面扫描电子显微镜照片

的间距小于光纤的传导波长,使内包层获得高达 0.55 的数值孔径,这种抽运结构具有 9 dB/m 的抽运光吸收系数.

通过在光纤内包层引入应力致双折射材料,可以达到偏振保持的效果.产生应力的材料为硼酸盐玻璃,其折射率比石英玻璃偏低,通过把它们排布成与内包层空气孔类似的周期性结构,可以使其等效折射率与内包层等效折射率匹配,从而不破坏光纤原有的模场分布.由于应力材料的热膨胀系数与普通石英玻璃不同,在光纤拉制过程中会产生一个永久的力场,这个力场引起的双折射足以使基模的两个简并的正交偏振态分离,从而使其中一个偏振态的折射率低于内包层等效折射率而不满足光纤内传输的弱导条件被损耗掉,确保光纤仅支持单偏振模式的传导^[10].实验中选用光纤的偏振消光比大于 10 dB,1060 nm 附近的单偏振带宽大于 100 nm.

2 实验装置

激光器的主体基于简单的法布里-帕罗谐振腔结构,装置如图 2 所示.实验中截取了 1.5 m 长的大模场面积光子晶体光纤,由于光纤的模场面积较大,其色散接近于石英玻璃的材料色散.抽运源使用输出波长为 976 nm 的大功率 LD,通过尾纤输出(纤芯直径为 200 μm,数值孔径为 0.22),并由非球面透镜耦合到大模场面积光子晶体光纤中,光子晶体光纤的弯曲半径为 15 cm,以抑制高阶模式的产生.光纤的两个端面均打磨成 8°角,防止在高功率抽运条件下产生自激振荡,从而保证激光器稳定运转.

大模场面积光子晶体光纤中的激光同样使用非球面镜耦合输出到自由光路,使该光路部分形成抽运端和输出端.1040 nm 附近的宽带高反射率介质镜和 SESAM 分别作为光纤激光器两个端镜.SESAM (BATOP, GmbH, 德国)基于 GaAs/AlAs 布拉格反射镜上低温分子束外延技术生长的 InGaAs 量子阱结构,其线性吸收为 65%,调制深度为 35%,饱和能流为 20 μJ/cm²,恢复时间 500 fs,通过一片焦距为 11 mm 的非球面透镜聚焦,使吸收体获得启动锁模所需的能量密度.激光器抽运端的双色镜 1 (15°入射时,对 976 nm 透射率>95%,1040 nm 反射率>99%)用于分离抽运光和激光,双色镜 2 和双色镜 3 与双色镜 1 的参数相同,放在输出端,用于过滤没有被光纤吸收的残余抽运光.双色镜之后插入半波片 1 及偏振分束器 1,



图2 双包层大模场面积光子晶体光纤飞秒激光器实验装置图

通过旋转半波片确保只激发沿光纤慢轴偏振的模式. 半波片 2 用于调整激光器的耦合输出率. 偏振分束器 2 的导出端作为激光器的耦合输出. 实验中通过旋转半波片 2, 使激光器的输出率保持在 90%, 这样既能保证最大限度的功率输出, 又能把 SESAM 上的平均功率控制在比较低的水平, 有效避免对 SESAM 的热损伤. 激光器有效腔长约 3 m, 使得锁模脉冲序列的重复频率为 51.4 MHz. 利用上升时间为 200 ps 高速响应光电二极管和采样频率为 4 GHz 的示波器探测锁模脉冲序列, 同时可以监测激光器的多脉冲运转.

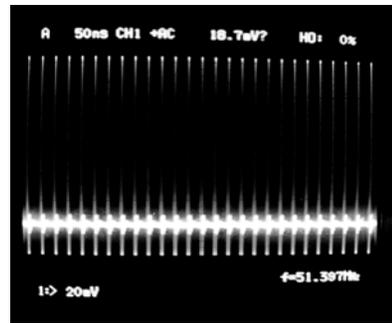


图4 激光器输出脉冲序列

3 实验结果

实验中在不使用任何腔内色散补偿元件的情况下, 通过增加抽运功率及仔细调节 SESAM 上的会聚光斑的大小, 实现激光器的稳定锁模运转. 激光器的抽运-输出功率曲线及不同的工作状态如图3所示. 在输出功率 500 mW 的情况下, 激光器出现调 Q 锁模, 在输出功率 800 mW 时达到稳定连续波锁模的阈值. 抽运功率增加至 12 W 时, 最高得到 2.5 W 的平均功率输出, 对应单脉冲能量为 50 nJ, 其输出的脉冲序列如图 4 所示. 锁模可以稳定工作数小时, 轻轻触摸光纤也不会对锁模造成影响, 体现了偏振光纤优越

的环境稳定性. 继续增加抽运功率, 激光器进入双脉冲运转状态, 此时仍可以稳定锁模, 只是一个腔循环周期内同时出现两个强度相同的超短激光脉冲, 对应每个脉冲的峰值功率减半. 可见, 光纤的非线性限制了单脉冲运转状态下脉冲能量的进一步提高.

在全正色散锁模域, 由于激光器谐振腔内没有反常色散, 其直接输出脉冲具有强烈的啁啾, 脉冲宽度在皮秒量级, 对应几个纳米的频谱宽度. 激光器稳定工作在 2.5 W 的输出功率情况下, 其输出脉冲的光谱如图 5 所示, 光谱的半极大全宽度为 5.2 nm, 具有陡峭的两沿, 这是全正色散锁模的典型特征. 激光器输出脉冲的自相关曲线如图 6 所示, 利用高斯函数进

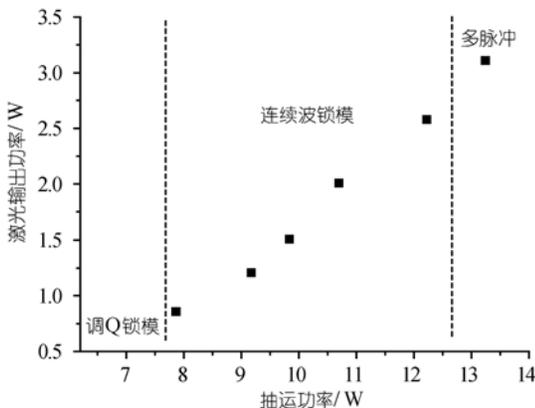


图3 激光器抽运-输出功率关系

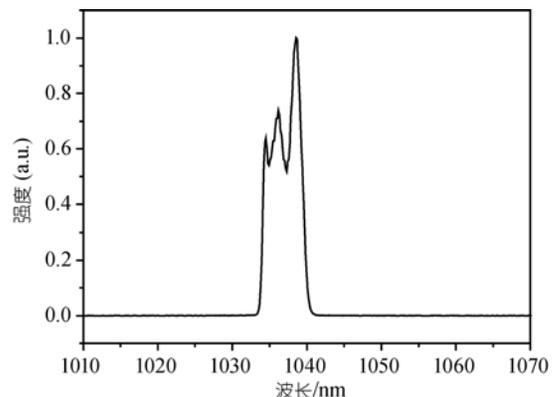


图5 激光器输出光谱

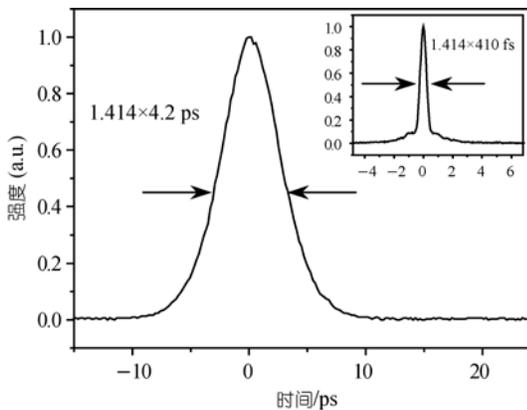


图6 激光器输出脉冲的自相关曲线
插图图为压缩后的脉冲自相关曲线

行拟合, 测量的脉冲半宽度为 4.2 ps. 腔外两次通过一对平行放置的 600 线/mm 的闪耀光栅进行色散补偿, 光栅表面镀金以提高衍射效率, 压缩后平均功率为 1.7 W, 脉冲形状如图 6 插图所示, 脉冲宽度为 410 fs, 脉冲被压缩了 10 倍. 这说明激光脉冲具有较大的线性啁啾. 压缩后脉冲的时间带宽积为 0.6, 是变换极限的 1.36 倍. 脉冲两沿存在没有被补偿的基底, 说明自相位调制展宽光谱的过程在脉冲两沿积累了非线性啁啾.

4 脉冲在腔内演化的动力学过程

我们对这种大模场面积光子晶体光纤飞秒激光器的锁模机制进行了进一步探索. 锁模激光器的内腔频谱形状可以反映其脉冲动力学过程. 由于激光器采用偏振控制的输出, 其输出端受到偏振滤波的影响, 并不能真实反映激光腔内的频谱形状. 为此, 用输出率 4% 的宽带输出镜代替全反镜作为激光器端镜, 此输出端的光谱就是谐振腔内的实际光谱. 在不同的抽运水平下, 4% 输出端的锁模光谱如图 7 所示, 随激光器输出功率的增加, 光谱明显展宽, 光谱形状也随之变化. 在输出功率比较低的状态下, 锁模光谱比较窄, 激光器内脉冲成形主要由 SESAM 的非线性吸收决定. 随着锁模激光器输出功率增加, 自相位调制引起的光谱展宽变得明显, 大模场面积光子晶体光纤的自相位调制、群速度色散、增益带宽的限制及 SESAM 的非线性吸收共同作用, 导致激光器腔内产

生超短脉冲. 锁模的动力学过程可以解释为: 频域上, 自相位调制展宽的光谱被增益带宽的限制所补偿; 时域上, 脉冲在光纤中的展宽由 SESAM 的非线性可饱和吸收补偿. 同时, 由于激光脉冲积累了很大的啁啾, 脉冲两沿的频谱成分处在增益谱线的边界, 得不到有效放大, 引起时域脉冲压缩. 这种光谱滤波的机制同时使激光频谱产生陡峭的两沿 [8].

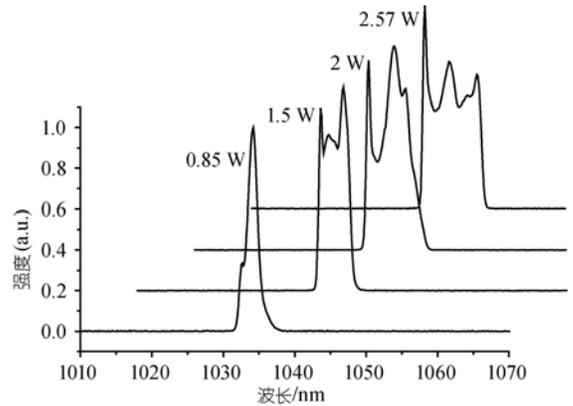


图7 激光腔内光谱随输出功率的变化

5 结论

本文对基于掺 Yb³⁺ 双包层大模场面积偏振光子晶体光纤的激光器全正色散域锁模运转进行了实验研究及锁模动力学过程的理论探索. 激光器利用半导体可饱和吸收镜实现自启动锁模. 其平均功率和单脉冲能量已经达到了普通固体锁模激光器的输出水平. 实验中获得了脉冲宽度为 4.2 ps, 重复频率为 51.4 MHz, 平均功率为 2.5 W, 单脉冲能量为 50 nJ 稳定的超短脉冲序列输出, 腔外压缩后脉冲宽度为 410 fs. 在低输出功率水平下, 激光器的脉冲成形由 SESAM 的非线性吸收决定. 而当输出功率较高、非线性较强时, 激光器的锁模运转主要取决于自相位调制展宽光谱与增益带宽的限制之间的平衡.

激光器运转稳定, 具有较高的平均功率和单脉冲能量输出, 使其可以直接用于飞秒微加工. 如果激光器的输出经过一段同样的大模场面积光子晶体光纤进行放大, 就可以实现一套紧凑型微焦耳量级的高重复频率飞秒激光系统, 在工业、科研等领域具有广泛的应用前景.

参考文献

1 Limpert J, Schreiber T, Nolte S, et al. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser. *Opt Express*, 2003, 11(7): 818—823

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

3 Lecaplain C, Chédot C, Hideur A, et al. High-power all-normal-dispersion femtosecond pulse generation from a Yb-doped large-mode-area microstructure fiber laser. *Opt Lett*, 2007, 32(18): 2738—2740[doi]

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

5 Tamura K, Nelson L E, Haus H A, et al. Soliton versus nonsoliton operation of fiber ring lasers. *Appl Phys Lett*, 1994, 64(2): 149—151[doi]

6 Tamura K, Ippen E P, Haus H A, et al. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser. *Opt Lett*, 1993, 18(13): 1080—1082

7 Ilday F Ö, Buckley J R, Clark W G, et al. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(21): 213902-1—213902-4[doi]

8 Chong A, Buckley J, Renninger W, et al. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser. *Opt Express*, 2006, 14(21): 10095—10100[doi]

9 Herda R, Okhotnikov O G. Dispersion compensation-free fiber laser mode-locked and stabilized by high-contrast saturable absorber mirror. *IEEE J Quantum Electron*, 2004, 40(7): 893—899[doi]

10 Schreiber T, Röser F, Schmidt O, et al. Stress-induced single-polarization single-transverse mode photonic crystal fiber with low nonlinearity. *Opt Express*, 2005, 13(19): 7621—7630[doi]

《中国科学 E 辑：技术科学》 第 38 卷 第 7 期 目次

大型同步发电机组 NR-PSS 及 RTDS 大扰动实验研究	卢强	郑少明	梅生伟	王钢	黄其励
TIME-IGGCAS 模式与经验模式和观测数据的比较	乐新安	万卫星	刘立波	宁百齐	赵必强
中国低纬度地区 GPS 周跳季节依赖特点分析	张东和	冯曼	郝永强	师立勤	杨光林
医用血管支架非线性扩张过程快速预测方法的研究	倪中华	顾兴中	王跃轩		
岩石孔隙结构的统计模型	鞠杨	杨永明	宋振铎	徐文静	
合金元素淬透性系数的经验电子理论分析	宋月鹏	刘国权	李志林	冯承明	
脉冲电场作用下合金熔体原子团簇尺度变化模型	张震斌	王建中	齐锦刚	王冰	何力佳
微生物细胞溶胶-凝胶法磁性化研究	陈博	詹天卓	连志阳	张德远	
MgH ₂ -V 体系 H 原子的扩散与吸附性能研究	周惦武	刘金水	彭平		
耐超高温连续 Si-Al-C 纤维的一步法制备与表征	郑春满	李效东	王浩	赵大方	胡天娇
两步法生长氮化铝中缓冲层和外延层工艺研究	刘启佳	张荣	谢自力	刘斌	徐峰
	姚靖	聂超	修向前	韩平	郑有焯
基于第一原理方法的有序 Si ₅₀ Ge ₅₀ 合金的声子谱的压力依赖性和热力学属性	吕梦雅	陈洲文	刘日平		
基于 SOM 神经网络的古代青瓷聚类分析	周少华	付略	梁宝鏊		
微波加热陶瓷中热失控现象的分析与控制	刘长军	申东雨			
电子束物理气相沉积钽钛合金薄膜的组分和厚度分布	李帅辉	舒勇华	樊菁		
弯曲河床中底沙运动和河床变形的三维 $k-\varepsilon-k_p$ 两相湍流模型	沈永明	刘诚			
不同条件下硝基苯在水-冰体系中的分配研究	李志军	王昕	李青山	许士国	徐向舟
					白炎