

自由耦合输出的大模场面积光子 晶体光纤锁模激光器*

张 驰 胡明列[†] 宋有建 张 鑫 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)

(2008 年 11 月 17 日收到 2009 年 3 月 14 日收到修改稿)

对一种基于高增益掺 Yb^{3+} 大模场面积光子晶体光纤(PCF)的锁模激光器进行了简化线型腔结构的实验和理论研究. 实验中直接使用塌陷打磨为 0° 角的光纤端面作为一端腔镜, 利用其端面反馈获得了激光振荡, 并进一步利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)和光栅对的滤波作用实现了稳定的锁模运转. 通过调节滤波程度, 使激光器实现了从宽带滤波锁模到窄带滤波锁模的连续可调谐. 在宽带滤波锁模的条件下, 得到了最大平均输出功率 2.2 W, 单脉冲能量 29.3 nJ, 脉冲宽度 367 fs 的锁模脉冲输出. 在窄带滤波锁模的条件下, 获得最大平均输出功率 4 W, 单脉冲能量 53.3 nJ, 脉冲宽度 1.14 ps 的锁模脉冲输出. 在理论上利用分布傅里叶方法对激光器进行了数值模拟, 模拟了锁模脉冲在激光器内的提取演化过程, 以及脉冲在腔内不同位置对应的特性变化.

关键词: 飞秒激光, 光纤激光器, 光子晶体光纤, 大模场面积光纤

PACC: 4281W, 4280W, 4260D

1. 引 言

目前飞秒激光器的技术指标基本上由发展最为成熟的固体锁模激光器所保持. 但固体激光器需要在超净超稳的苛刻条件中运行, 并且价格昂贵、操作复杂、维护成本高, 这些条件都限制了其进一步应用和普及. 光纤锁模激光器的出现, 使飞秒激光器走出实验室成为了可能. 光纤激光器将激光限制在波导中传输, 具有很好的环境稳定性和更加紧凑的结构, 同时可以用价格低廉的激光二极管直接抽运, 大大降低了成本. 掺镱(Yb^{3+})石英光纤具有增益谱线宽, 光光转换效率高, 量子缺陷小等优势, 非常适合作为高功率光纤激光器的增益介质. 近年来, 随着对锁模光纤激光器中脉冲动力学机理研究的深入和新型低非线性光纤的开发研制, 掺 Yb^{3+} 锁模光纤激光器的平均功率、单脉冲能量等输出指标不断提高, 在某些参数方面已经接近并逐渐超越传统固体锁模激

光器的水平.

传统光纤模场面积很小, 非线性效应很强, 使脉冲在传输过程中容易积累过度的非线性相移而产生分裂, 因此无法支持高功率的脉冲输出^[1]. 大模场面积光纤的出现有效地解决了这个问题, 但是普通大模场面积光纤往往支持多模式传输^[2], 锁模光斑的质量较差. 新型掺 Yb^{3+} 大模场面积光子晶体光纤^[3]具有极低的非线性系数, 有效地降低了脉冲传输过程中非线性相移的积累, 同时可以保证激光的单基模传输, 因此成为高功率锁模光纤激光器的理想增益介质. 2007 年 Ortaç 等人利用掺 Yb^{3+} 大模场面积光子晶体光纤搭建了 σ 腔结构的锁模光纤激光器, 从振荡级直接获得了单脉冲能量为 16 nJ, 脉冲宽度为 500 fs 的超短脉冲输出^[4]. 同年, Lecaplain 等人利用 1 m 长的大模场面积光子晶体光纤实现了单脉冲能量 71 nJ, 脉冲宽度 5.5 ps 的全正色散锁模, 经腔外压缩得到了 516 fs 的锁模脉冲序列^[5]. 而 Ortaç 小组又利用基于棒状光子晶体光纤的全正色散锁模光

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB806002, 2010CB327604), 国家高技术研究发展计划(批准号: 2007AA03Z447), 国家自然科学基金(批准号: 60678012 和 60838004), 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20070056083, 20070056073), 教育部科学技术研究重点项目(批准号: 108032), 全国博士学位论文作者专项基金项目(批准号: 2007B34), 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-07-0597)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: huminglie@tju.edu.cn

纤激光器得到了单脉冲能量 265 nJ,腔外压缩后脉冲宽度 400 fs 的锁模脉冲输出^[6],这也是迄今为止直接从掺 Yb³⁺ 光纤锁模激光器输出的最大能量脉冲.国内也同时开展了这一领域的实验研究,并利用偏振型大模场面积光子晶体光纤构建了线型腔锁模激光器,在全正色散区域实现了单脉冲能量 50 nJ,脉冲宽度 4.2 ps 的锁模脉冲输出,经过腔外色散补偿,脉冲宽度压缩至 410 fs^[7];在零色散点附近,得到了单脉冲能量 9 nJ,脉冲宽度 500 fs 的孤子锁模脉冲输出,经过腔外压缩,脉冲宽度达到 98 fs^[8];在负色散区,实现了单脉冲能量 14.8 nJ,脉冲宽度 518 fs 的孤子锁模脉冲输出^[9],并将该激光器成功用于抽运产生太赫兹波^[10].

上述激光器中^[4-10]包含了大量的自由光路偏振控制器件,使激光器结构相对复杂.本文简化了文献[7-10]中使用的线型腔,直接将光子晶体光纤一个端面塌陷打磨成 0°角,利用其自身的反馈获得了激光振荡,省去了复杂的偏振元件和输出器件,并利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 获得了稳定的锁模脉冲输出.通过调节腔内滤波程度,实现了从宽带滤波锁模至窄带滤波锁模的连续可调谐,得到单脉冲能量 29.3 nJ,脉冲宽度 367 fs 的飞秒锁模脉冲输出,和单脉冲能量 53.3 nJ,脉冲宽度 1.14 ps 的皮秒锁模脉冲输出.

2. 实验装置

激光器的结构如图 1 所示.增益光纤选用的是

1 m 长的掺 Yb³⁺ 偏振型大模场面积光子晶体光纤 (Crystal Fibre A/S, 丹麦).图 1 中插图 (b) 给出了光纤横截面的图示.光纤增益纤芯的模场直径为 29 μm (对应的模场面积为 660 μm²),数值孔径为 0.03.内包层直径为 200 μm,作为抽运光的纤芯.光纤的外包层由一层空气孔构成,又称为“空气包层”,它使内包层数值孔径高达 0.55,可以充分吸收抽运光.通过在光纤纤芯附近引入了与包层折射率匹配的应力生成元来产生足够的双折射,使基模的两个简并的正交偏振态在传输过程中逐渐分离,并且设计令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在光纤内传输的弱导条件被损耗掉,从而使光纤达到单一偏振传输.

抽运光源使用输出中心波长为 976 nm 的大功率 LD,抽运光通过焦距为 11 mm 的非球面透镜耦合入光纤.纤芯内 Yb³⁺ 离子的掺杂浓度很高,使其对于 976 nm 抽运光的吸收系数为 9 dB/m.抽运光耦合端的光纤端面研磨成 8°角 (如图 1 中插图 (c) 所示),用以防止自激振荡的产生.光纤的另一端打磨成 0°角 (如图 1 中插图 (d) 所示),直接作为输出端,其具有光滑平整的表面 (如图 1 中插图 (e) 所示),输出率约为 96%,并利用该端面的反馈与 SESAM 形成激光谐振腔.双色镜 DM₁ 在 20°入射时对中心波长 976 nm 的抽运光透过率大于 95%,同样角度下对中心波长 1037 nm 的激光反射率大于 99%,其作用是分离抽运光和激光,让抽运光充分耦合入光纤,同时使激光充分反射而不至于反馈回 LD 而将其损坏,同

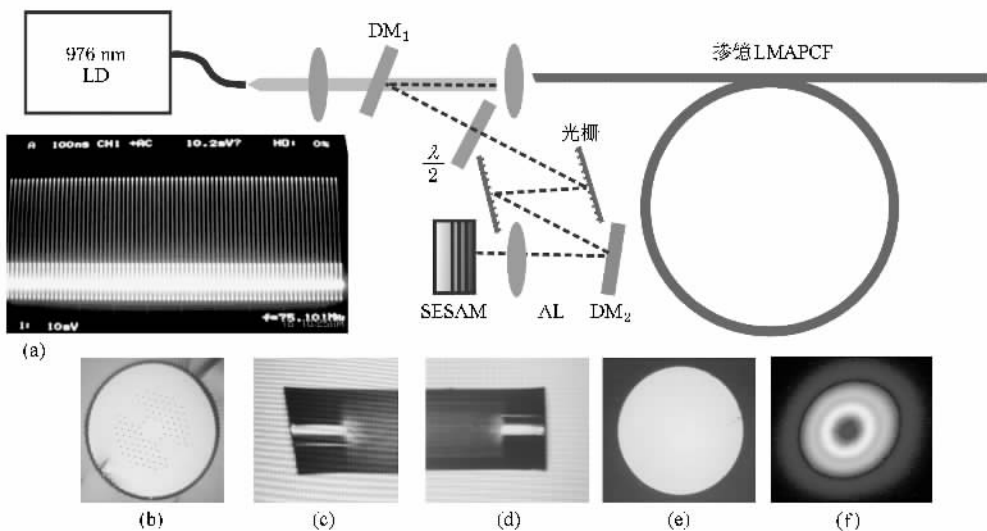


图 1 自由耦合输出端锁模光纤激光器结构示意图 (a)为锁模脉冲序列 (b)为所用光子晶体光纤截面图 (c)为 8°端面 (d)为 0°端面 (e)为塌陷打磨后的光纤端面 (f)为激光器输出光束质量

样的双色镜 DM_2 用于折叠光路. 实验中使用的 SESAM 是基于 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, 线性吸收率为 65%, 调制深度为 35%, 饱和能流密度 $20 \mu J/cm^2$, 恢复时间为 500 fs. 实验中通过焦距为 8 mm 的非球面透镜将光束聚焦在 SESAM 上, 从而使其获得自启动锁模所需的能量密度.

腔内正色散主要来自光纤的材料色散, 为 $0.019 ps^2/m$, 一个循环周期内共产生 $0.038 ps^2/m$ 的色散量. 实验中利用一对 600 线/毫米的镀金闪耀光栅进行色散补偿, 光栅对间距为 2.5 cm, 经计算, 提供的负色散量约为 $-0.0648 ps^2$, 于是腔内的净色散量为 $-0.0268 ps^2$, 激光器工作在负色散锁模区. 由于光栅的衍射效率对偏振敏感, 因此需要在光栅对前放置半波片, 通过调节半波片使得入射光的偏振方向与光栅衍射效率最高的偏振方向一致.

3. 实验结果

利用光纤端面作为反射镜, 省去了线型腔内的偏振元件, 降低了光路调整的复杂性. 首先利用 4% 输出镜代替 SESAM, 可以测得激光器运转时输出功率与 SESAM 上功率的对应值. 实验测得, 当输出功率为 3 W 时, SESAM 上功率仅有 150 mW, 功率比约

为 20:1. 这一点保证了在激光器输出极高功率的同时, SESAM 上的功率仍然维持在其破坏阈值以下. 这种 20:1 的比值是由特殊的腔形结构决定的. 虽然 0° 输出端的透射率为 96%, 对应反馈率为 4%, 但是经过在剩余塌陷部分中的传播, 从纤芯出射的激光到达端面使的光束发散开, 而从端面反馈的光回到纤芯时进一步发散, 仅有一小部分光耦合回光纤. 理论推算这部分能量约为输出的 1%. 这样小的能量经过光纤的放大后仍比输出小很多, 再经过光栅对的损耗, 到达 SESAM 的能量为一个相对较小值. 利用聚焦用的非球面透镜调节 SESAM 上汇聚光斑大小, 并调节光栅对的角度, 可以获得稳定的锁模运转. 图 1 中插图 (a) 给出了模拟示波器上得到的锁模脉冲序列, 重复频率约为 75 MHz. 输出模场截面如图 1 中插图 (f) 所示, 是具有良好光束质量的基模模场.

激光器可以实现飞秒锁模状态到皮秒锁模状态的时域可调谐, 这种调谐特性是由激光器中的滤波机理实现的. 经过光栅对到达 SESAM 后, 光束截面由圆形被拉伸成椭圆形, 这对应于激光频率成分在空间中展开. 微调 SESAM 的角度或光栅对的角度, 让大部分频率成分返回光纤参与锁模, 则可以实现宽带滤波锁模, 激光器工作在飞秒锁模状态. 若只有少部分频率成分返回光纤参与锁模, 则可以实现窄带滤波锁模, 激光器工作在皮秒锁模状态.

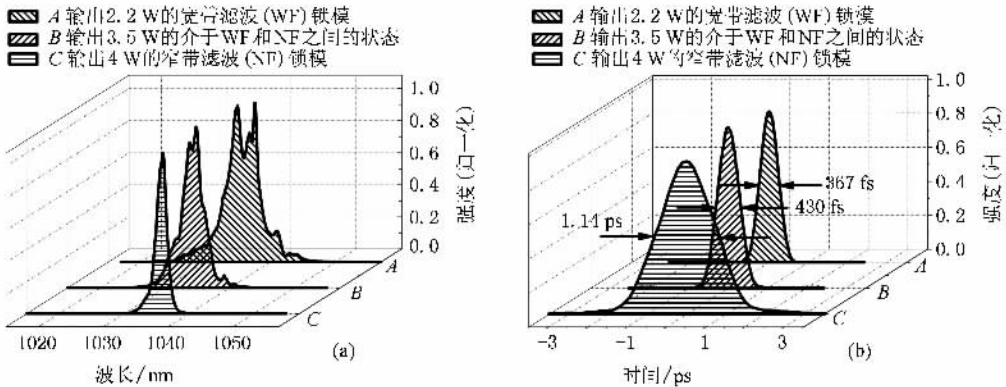


图2 从宽带锁模向窄带锁模过度的脉冲光谱和自相关曲线变化, A 为输出平均功率 2.2 W 的宽带锁模状态, B 为平均功率 3.5 W 的中间状态, C 为平均功率 4 W 的窄带锁模状态

宽带锁模状态下的光谱较宽, 直接输出脉冲宽度为飞秒量级. 典型的稳定单脉冲锁模的起始抽运光阈值为 10.5 W, 此时锁模脉冲的平均输出功率为 770 mW. 进一步增加抽运功率, 锁模仍然持续. 这种锁模状态所能支持的最大平均输出功率为 2.2 W, 对应单脉冲能量 29.3 nJ, 其光谱形状和脉冲自相关

曲线分别如图 2 (a) (b) 中 A 曲线所示, 光谱宽度约为 6 nm, 并具有明显的孤子边带, 脉冲宽度为 367 fs. 进一步经过腔外色散补偿, 可以将脉冲宽度压缩至 253 fs. 通过调节 SESAM 角度或光栅对角度, 减小滤波带宽, 获得稳定锁模的起始抽运光阈值得提高, 锁模光谱宽度变窄, 脉冲宽度加宽. 图 2 (a) (b) 中 B

曲线分别给出了一组输出平均功率为 3.5 W 的锁模脉冲光谱形状和自相关曲线,光谱宽度约为 4 nm,脉冲宽度为 430 fs.进一步减小滤波带宽,可实现窄带锁模.此时锁模光谱较窄,直接输出脉冲宽度为皮秒量级.稳定单脉冲锁模的起始抽运光阈值为 15.3 W,平均输出功率为 1.5 W.这种锁模状态所能支持的最大平均输出功率为 4 W,对应单脉冲能量 53.3 nJ,其光谱形状和脉冲自相关曲线如图 2(a)(b)中 C 曲线所示,光谱宽度约为 2 nm,脉冲宽度为 1.14 ps.

图 3 给出了两种滤波锁模状态下的斜效率曲线.由于减小滤波带宽给腔内引入了额外的损耗,因此窄带滤波锁模的斜效率低于宽带滤波锁模,即皮秒工作状态的斜效率低于飞秒工作状态.随着由飞秒工作区向皮秒工作区的过度,斜效率逐渐降低,锁模的阈值逐渐提高,但锁模单脉冲所能支持的最大能量逐渐增大,从宽带滤波状态下的 2.2 W 至窄带滤波状态下的 4 W,而介于两种极限状态之间的最大单脉冲锁模输出 3.5 W 刚好位于前两者的连线上.这是由于非线性相移的积累由峰值功率决定,而脉冲宽度增加,峰值功率相对降低,因此可以支持更高的脉冲能量及平均功率.在图 3 阴影部分所示的功率范围内均可以得到稳定的单脉冲锁模.而阴影部分上下分别对应多脉冲锁模状态和连续波运转状态.

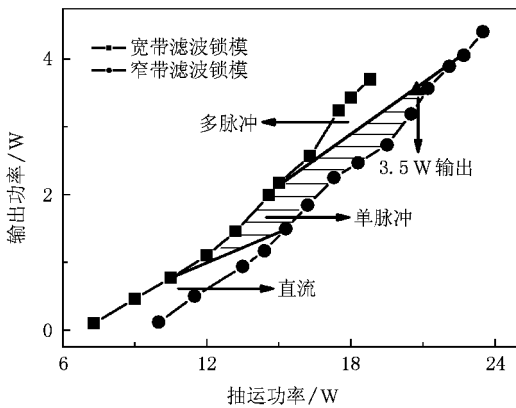


图 3 宽带滤波锁模和窄带滤波锁模的输出功率特性

4. 理论模拟

为了进一步对这种激光器的腔内动力学过程进行理解,对激光器进行了数值模拟.对应图 1 所示的光路图,假设脉冲从增益光纤入口处开始传播,经过增益光纤放大后从光纤中出射,此时激光腔具有 99% 的功率损耗,剩余的反馈光再次经过增益光纤

被放大.从光纤出射的光束经过光栅对进行色散补偿,到达 SESAM 进行可饱和吸收,随后经过反射第二次经过光栅对,并从增益光纤入口再次耦合入光纤(此时需要考虑一定滤波效果),即完成了一次腔内循环过程.这样,锁模脉冲的主要特性就由增益光纤、光栅对、输出率、滤波效应以及 SESAM 决定.只要知道了上述五个元件的理论模型,就可以通过数值方法求出使激光器稳定运转的解,这个解就是对线型腔锁模激光器中锁模脉冲的数值模拟.

对增益光纤的模拟是使用分布傅里叶方法对如下带有增益项的非线性薛定谔方程((1)式)进行求解,并考虑了小信号增益沿光纤长度成指数下降以及增益饱和效应.

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i\alpha}{2} A + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{i\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} - \gamma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} \times \left(|A|^2 A - T_{RA} \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right) \right]. \quad (1)$$

对光栅的模拟是将其视为无非线性效应,只具有色散特性的器件.激光输出对激光器腔内功率直接造成影响,其结果是出射端激光功率乘以反馈率 R .滤波作用采用高斯滤波函数模拟.

对 SESAM 的处理利用了其非线性强度反射率公式

$$R(t) = e^{-2q(t)} - (S_{\text{loss}} - \Delta R), \quad (2)$$

其中 S_{loss} 为 SESAM 的线性吸收率, ΔR 为 SESAM 的调制深度, $q(t)$ 由下面式子给出:

$$\frac{dq(t)}{dt} = -\frac{q(t) - q_0}{T_{\text{rec}}} - \frac{q(t)|\psi|^2}{E_{\text{sat}}}, \quad (3)$$

其中 $q_0 = -\frac{1}{2} \log(1 - \Delta R)$, T_{rec} 为回复时间, E_{sat} 为 SESAM 的饱和吸收能量, ψ 为光场强度.

在上面处理的基础上设定一些基本参数:光纤长度 $L = 1$ m,模场面积 $A_{\text{eff}} = 660 \mu\text{m}^2$,增益光纤掺杂浓度 $\alpha_p = 9$ dB/m,二阶色散 $\beta_2 = 0.019$ ps²/m,三阶色散 $\beta_3 = 0$,非线性折射率 $n_2 = 2.5 \times 10^{-20}$ m²/W,光纤增益饱和能量 $E_s = 10$ nJ,初始小信号增益 $g_0 = 10$ m⁻¹,反馈率 $R = 0.01$,激光中心波长 $\lambda = 1037$ nm,光栅对单次提供色散 $\beta_2^{\text{DC}} = -0.0324$ ps², SESAM 的线性吸收率 $S_{\text{loss}} = 65\%$,调制深度为 $\Delta R = 35\%$,吸收恢复时间为 $T_r = 0.5$ ps, SESAM 的饱和能量设为 $E_{\text{sat}} = 0.1$ nJ,初始脉冲为随机高斯信号.再适当地设置时间、光谱窗口和计算步长,并更改滤波

带宽,即可以通过数值模拟得到锁模脉冲的输出特性.

模拟得到的宽带锁模脉冲形状和频谱形状分别如图 4(a)(b)所示.光谱宽度约为 6 nm,脉冲宽度 400 fs,单脉冲能量约为 25 nJ,与实验结果基本符合.图 5 给出了宽带滤波锁模状态下激光器从噪声中提取脉冲的过程以及激光器中不同位置对应的脉冲时域和频域变化过程.图 5(a)(b)的纵坐标对应腔内循环次数,横坐标分别对应时间和波长,25 次循环左右激光器提取出自启动所需的较强信号,50 次循环后锁模基本达到稳定.图 5(c)(d)纵坐标代表腔内不同位置,横坐标分别为时间和波长.对于图

5(c),从纵坐标 0 步起始,具有负啁啾的脉冲进入光纤在时域上先压缩后展宽,在 55 步时从光纤 0^o端面输出,并损耗大部分能量,这对应着 96% 的激光输出,少量反馈光经端面反射后重新耦合回光纤,并被继续展宽,到达 110 步从光纤 8^o端面出射,然后经过光栅对进行色散补偿,脉冲在时域上被压缩,约 160 步时第一次通过光栅对并入射到 SESAM 上,实现可饱和吸收,经 SESAM 反射后再次经过光栅对进行压缩,由于光栅对距离较大,在未返回光纤前脉冲已经达到压缩极限,进而被过压缩而展宽,210 步时脉冲带着较强的负啁啾重新返回光纤,以上就完成了—次腔内循环.

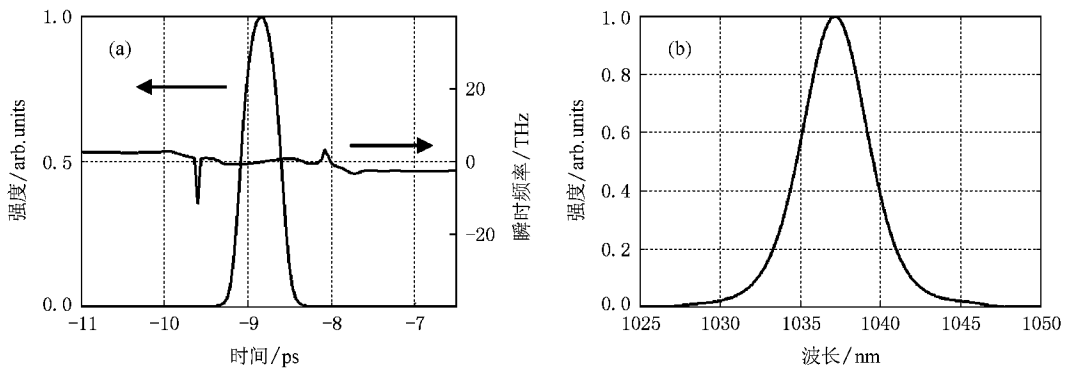


图 4 数值模拟得到的宽带锁模脉冲形状 (a) 和光谱形状 (b)

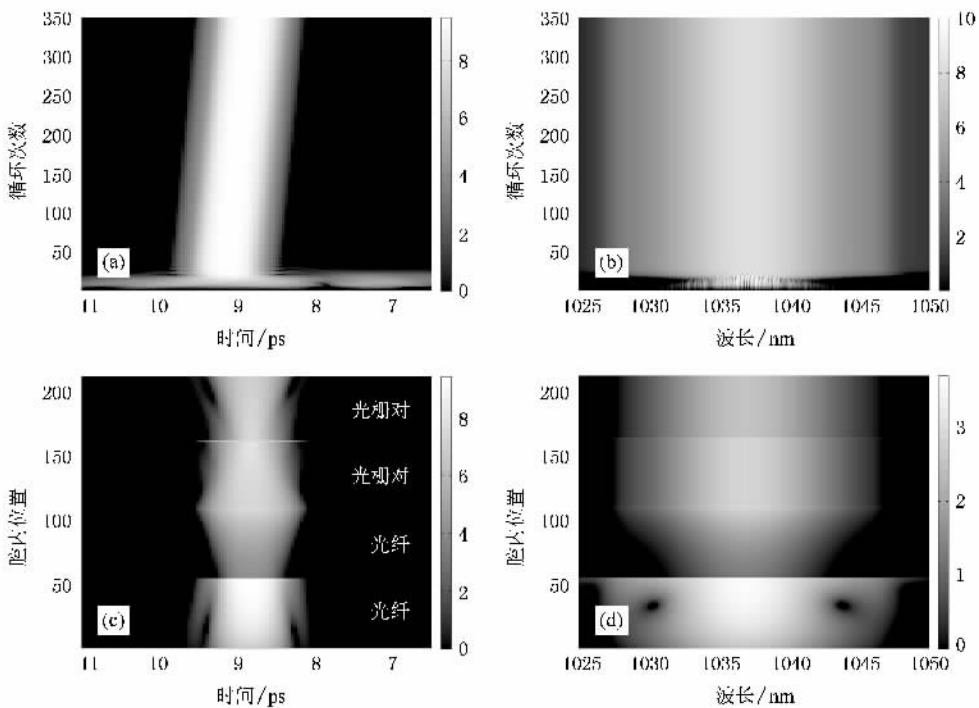


图 5 (a)(b)为激光器宽带滤波锁模时从噪声中提取锁模脉冲的时域和频域示意图 (c)(d)为此腔内不同位置对应的脉冲时域和频域的变化

图 6 给出了对窄带锁模进行数值模拟得到的锁模脉冲形状和频谱形状,可见光谱宽度明显变窄,约

为 2 nm,同时脉冲宽度加宽,约为 1.1 ps,与实验结果基本符合.

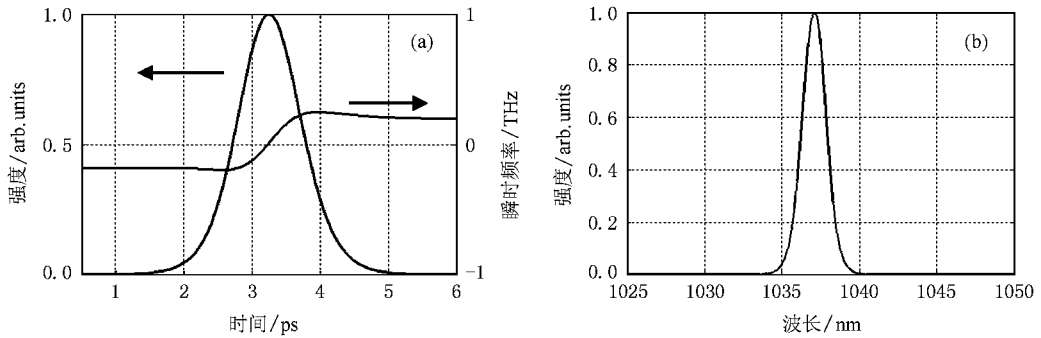


图 6 数值模拟得到的窄带滤波锁模脉冲形状(a)和光谱形状(b)

图 7 给出了窄带滤波锁模状态激光器从噪声中提取锁模脉冲的过程以及激光器中不同位置对应的

脉冲时域和频域变化过程.其腔内动力学过程与宽带锁模下很近似,只是光谱变窄,脉冲变宽.

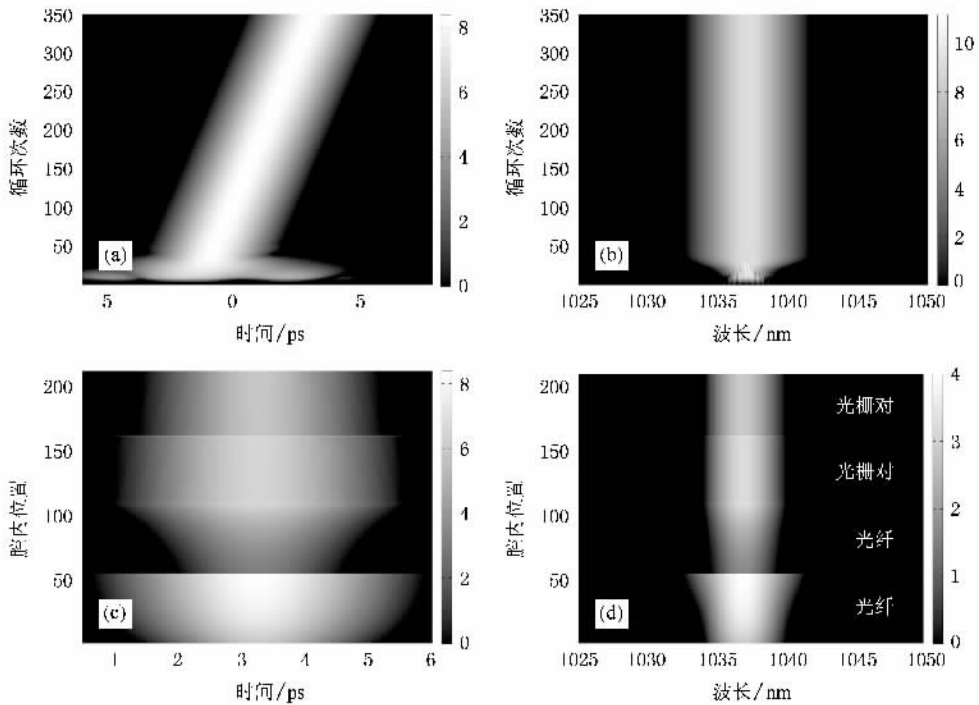


图 7 (a)(b)为激光器窄带滤波锁模时从噪声中提取锁模脉冲的时域和频域示意图(c)(d)为此时腔内不同位置对应的脉冲时域和频域的变化

5. 结 论

本文基于 F-P 结构设计了一种具有自由输出耦合端结构的高功率锁模光纤激光器,利用保偏掺 Yb³⁺ 大模场面积光子晶体光纤作为增益介质,并使用精细打磨为 0° 光纤端面作为输出腔镜,结合 SESAM 以及光栅对实现了稳定孤子锁模运转.通过

滤波效应,实现了输出脉冲宽度和光谱宽度的连续可调谐,并得到了单脉冲能量 29.3 nJ,脉冲宽度 367 fs 的飞秒锁模脉冲输出,以及单脉冲能量 53.3 nJ,脉冲宽度 1.14 ps 的锁模脉冲输出.此外,利用分布傅里叶方法对激光器进行了数值模拟,得到与实验基本相符的结论,进而对脉冲在这种新型激光器内的演化过程进行了深入分析.由于利用光纤端面作为输出镜,输出端可以方便地根据需要移动到适当

位置,极大地方便了使用.同时,激光器省去了大量偏振分立元件,降低了其成本和调节复杂性,并使激光器具有很小巧的结构.因此,集稳定、输出功率高、

简单为一体的自由耦合输出端锁模光纤激光器为高功率锁模光纤激光器的进一步发展提供了可行的方案.

-
- [1] Anderson D , Desaix M , Lisak M , Quiroga-Teixeiro M L 1992 *J. Opt. Soc. Am.* B **9** 1358
- [2] Limpert J , Röser F , Schreiber T , Tünnermann A 2006 *IEEE. J. Quantum Electron.* **12** 233
- [3] Schreiber T , Röser F , Schmidt O , Limpert J , Iliew R , Lederer F , Petersson A , Jacobsen C , Hansen K P , Broeng J , Tünnermann A 2005 *Opt. Express.* **13** 7621
- [4] Ortaç B , Limpert J , Tünnermann A 2007 *Opt. Lett.* **32** 2149
- [5] Lecaplain C , Chédot C , Hideur A , Ortaç B , Limpert J 2007 *Opt. Lett.* **32** 2738
- [6] Ortaç B , Schmidt O , Schreiber T , Limpert J , Tünnermann A , Hideur A 2007 *Opt. Express.* **15** 10725
- [7] Song Y J , Hu M L , Zhang C , Chai L , Wang C Y 2008 *Chin. Science Bulletin* **53** 1511 (in Chinese)[宋有建、胡明列、张驰、柴路、王清月 2008 科学通报 **53** 1511]
- [8] Song Y J , Hu M L , Zhang C , Liu B W , Chai L , Wang C Y 2008 *Chin. J. Laser* **35** 830 (in Chinese)[宋有建、胡明列、张驰、刘博文、柴路、王清月 2008 中国激光 **35** 830]
- [9] Song Y J , Hu M L , Liu B W , Chai L , Wang C Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6425 (in Chinese)[宋有建、胡明列、刘博文、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 6425]
- [10] Song Y J , Hu M L , Wang C L , Tian Z , Xing Q R , Chai L , Wang C Y 2008 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **20** 1088

An Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber mode-locking laser with free output coupler^{*}

Zhang Chi Hu Ming-Lie[†] Song You-Jian Zhang Xin Chai Lu Wang Qing-Yue

(*Ultrafast Laser Lab , College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering , Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science (Tianjin University) , Ministry of Education , Tianjin 300072 , China*)

(Received 17 November 2008 ; revised manuscript received 14 March 2009)

Abstract

The theoretical and experimental study of an Yb-doped double clad large mode area photonic crystal fiber laser is reported. This fiber laser system uses one facet of the fiber directly as a cavity mirror , which is fine-polished to 0° angle after collapsing. Lasing is obtained with the feedback of this facet , and mode-locking is achieved by using a semiconductor saturable absorber as another cavity mirror and adding a grating-pair as the spectral filter. By adjusting the filtering conditions , continuous tuning from wide filtering condition to narrow filtering condition is achieved. Under the wide filtering condition , the system generates femtosecond pulses , the highest average power of which is 2.2 W , corresponding to 29.3 nJ pulse energy and 367 fs pulse duration ; under the narrow filtering condition , it generates picosecond pulses , the highest average power of which is 4 W , corresponding to 53.3 nJ pulse energy and 1.14 ps pulse duration. In numerical simulation , the evolution and cavity-position-related characteristics of pulses are studied by using split-step Fourier method.

Keywords : femtosecond laser , fiber laser , photonic crystal fiber , large-mode-area fiber

PACC : 4281W , 4280W , 4260D

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2006CB806002 and 2010CB327604) , the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z447) , the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60678012 and 60838004) , the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant Nos. 20070056083 and 20070056073) , the Key Project of Chinese Ministry of Education. (Grant No. 108032) , FANEDI (Grant No. 2007B34) , and NCEI (Grant No. NCET-07-0597) .

[†] Corresponding author. E-mail : huminglie@tju.edu.cn