

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.04.07

163 fs 被动锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器

国佳帅, 武腾飞, 梁志国, 王宇, 赵春播, 韩继博

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 研制了一种采用非线性偏振旋转锁模效应的被动锁模掺 Er^{3+} 飞秒激光器。利用性能稳定的 980 nm 激光二极管(LD)作为抽运光源, 以高掺杂 Er^{3+} 光纤为增益介质, 在抽运功率为 650 mW 时, 激光器锁模输出重复频率为 31.25 MHz、平均输出功率为 70 mW、中心波长为 1565 nm、光脉冲宽度为 163 fs 的稳定飞秒脉冲激光。该激光器易于操作和调节, 并且锁模状态稳定可以长时间的运行, 其光纤结构更有利于小型化和便携化。

关键词: 激光器; 光纤激光器; 飞秒脉冲; 掺 Er^{3+} 光纤

中图分类号: TN24; TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)04-0027-03

163 fs Passively Mode-locked Er^{3+} -doped Fiber Ring Laser

GUO Jiashuai, WU Tengfei, LIANG Zhiguo, WANG Yu, ZHAO Chunbo, HAN Jibo

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A passively mode-locked fiber ring laser with a small segment of Er^{3+} -doped fiber as gain medium, pumped by a stable 980 nm laser diode and mode-locked by the nonlinear polarization rotation (NPR) technique, was successfully achieved. When the laser was pumped at 650 mW, stable mode-locked pulses centered at 1560 nm with 163 fs pulse width, and the output power was 70 mW. The repetition rate is 31.25 MHz. The laser presented here has advantages of being easy to operate and adjust, long-running and better stability. The fiber structure is of miniaturization, integration and portability.

Key words: laser; fiber ring laser; femtosecond pulses; Er^{3+} -doped fiber

0 引言

近年来, 高重复频率的飞秒激光器在应用领域有着较大的需求。但是很多激光器的价格昂贵, 体积庞大, 需要专业人士进行维护操作, 使用起来很不方便。随着光纤制造工艺和半导体激光器技术的不断进步, 以光纤为基质的光纤激光器, 在降低阈值、提升光斑质量、增加工作波长范围和波长可调谐等方面的性能取得了明显的进步。锁模光纤激光器的出现, 被认为是第二代光源, 在光频标、微加工、太赫兹产生、医学等方面具有广阔的应用前景^[1-3]。全光纤的器件可以实现激光器的小型化, 成本也大大的降低, 同时在性能和参数上可以与固体激光器相媲美, 成为当前激

光领域的研究热点和新兴技术。

利用被动锁模产生超短脉冲主要有三种方法: 非线性放大复合环形镜、可饱和吸收镜和非线性偏振旋转, 其中采用非线性放大复合环形镜或可饱和吸收镜的方法产生脉冲激光的脉冲宽度低于 500 fs, 而对于非线性偏振旋转方法来说, 如果增加色散管理, 压缩谐振腔中展宽放大的脉冲, 即为展宽脉冲环形光纤激光器, 可以产生超短飞秒脉冲(低于 100 fs)^[4]。国内飞秒脉冲激光器的实现最早在 20 世纪 90 年代, 1996 年陈国夫等人利用同步泵浦光纤喇曼环形激光器在 1.396 μm 处得到了 195 fs 的光脉冲。北京大学的张志刚所带领的团队在高重复频率光纤激光器和光纤频率梳, 特别是天文光学频率梳方面, 在国际上保持领先的水平。近几年也有很多大学、研究所在这一领域开展工作, 例如北京理工大学、天津大学、中科院上海光机所和华东师范大学等^[5-8]。

文中利用掺 Er^{3+} 飞秒光纤激光器的非线性偏振旋转效应, 通过控制激光谐振腔内的偏振器来产生长时间稳定锁模激光脉冲输出。通过理论分析和仿真并且

收稿日期: 2015-04-20; 修回日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61205169); 国家“十二五”技术基础科研项目(JSJC2012205B003)

作者简介: 国佳帅(1990-)男, 硕士研究生, 从事飞秒测距信号采集处理方面的研究; 武腾飞(1983-), 男, 高级工程师, 博士, 从事飞秒激光测量技术研究。

结合后期的实验验证, 证明所研制的飞秒激光器具有很好的工程应用价值。

1 实验原理和装置

图 1 为掺 Er³⁺ 飞秒光纤激光器的原理图, 泵浦源与波分复用器(980/1550)连接, 产生的光耦合后进入谐振腔, 90% 的光进入高掺杂掺 Er³⁺ 增益光纤中, 10% 从另一端输出, 减少光脉冲在单模光纤内能量衰减, 降低单模光纤中的非线性效应, 经过多次循环后, 从分束器输出激光脉冲。飞秒光纤激光器的谐振腔由偏正控制器 PC1, PC2 和偏振相关隔离器组成^[4]。使用隔离来保证激光器内部激光的单方向运转。为了提高锁模脉冲输出的重复频率, 必须减少激光器的腔长, 同时还要保证掺 Er³⁺ 光纤长度满足系统锁模状态下的增益需求。通过控制谐振腔中光纤尾纤的长度和增益光纤的长度使腔内色散为负, 从而获得最小的锁模脉冲输出。

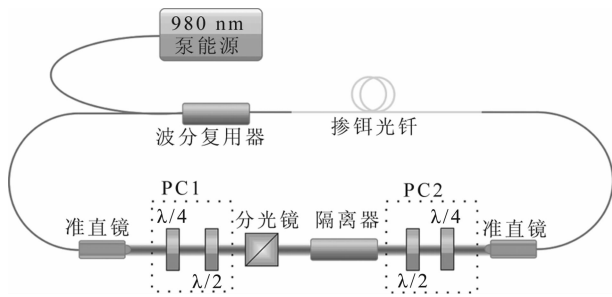


图 1 掺 Er³⁺ 光纤锁模激光器结构图

在数值模拟的过程中使用薛定谔方程来描述光在光纤中的传播:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial Z} &= i \frac{\Delta u}{2} P - \delta \frac{\partial P}{\partial T} - i \frac{u_2}{2} \frac{\partial^2 P}{\partial T^2} + \frac{u_3}{6} \frac{\partial^3 P}{\partial T^3} + i\gamma \\ (|P|^2 + \frac{2}{3} |Q|^2) P + \frac{i\gamma}{3} Q^2 P^* + \frac{g}{2} P + \frac{g}{2\omega_g^2} \frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \\ \frac{\partial Q}{\partial Z} &= -i \frac{\Delta u}{2} Q + \delta \frac{\partial Q}{\partial T} - i \frac{u_2}{2} \frac{\partial^2 Q}{\partial T^2} + \frac{u_3}{6} \frac{\partial^3 Q}{\partial T^3} + i\gamma \\ (|Q|^2 + \frac{2}{3} |P|^2) Q + \frac{i\gamma}{3} P^2 Q^* + \frac{g}{2} Q + \frac{g}{2\omega_g^2} \frac{\partial^2 Q}{\partial T^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: P 和 Q 表示在两个正交偏振模式下的归一化电场包络的慢变振幅; $\Delta u = u_{0x} - u_{0y} = 2\pi B_m / \lambda = 2\pi / L_B$ 表示两个模式的不同波数, $L_B = \lambda / B_m$ 表示为拍长; $\delta = (u_{1x} - u_{1y}) / 2$, 其表示不同群速度的偏振态的差。 u_{1x} , u_{1y} 为相互正交偏振模式下不同的群速度; u_2 为群速度色散 (GVD); u_3 为三阶色散参数 (TOD); γ 为在光纤内部传输的非线性系数; $T = t - z / v_g = t -$

$[(u_{1x} + u_{1y}) / 2]$, $Z = z$, 该变化表示引入以群速度 v_g 移动的参考系 (即所谓的延时系); $\frac{g}{2\omega_g^2} \frac{\partial^2 P}{\partial T^2}$ 和 $\frac{g}{2\omega_g^2} \frac{\partial^2 Q}{\partial T^2}$ 是掺 Er³⁺ 光纤内的增益色散, ω_g 表示为内部增益带宽, g 表示为掺 Er³⁺ 光纤内部饱和增益。

$$g = G \exp \left[- \frac{\int (|P|^2 + |Q|^2) dt}{P_{sat}} \right] \quad (2)$$

式中: G 为小信号增益; P_{sat} 为归一化的饱和能量^[9]。激光谐振腔中单模光纤的长度为 5 m, 增益光纤长度为 0.5 m。通过公式 (2) 计算模拟可得, 在激光开始工作一段时间后, 可以达到自动锁模的状态 (图 2)。

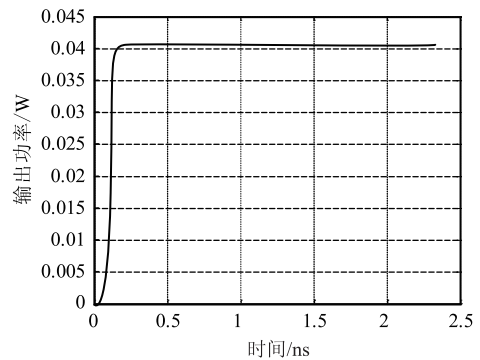


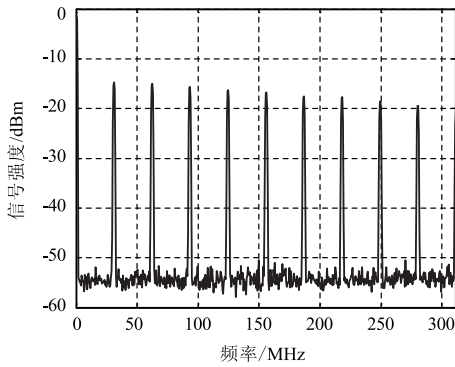
图 2 激光器稳定锁模理论模拟图

该激光器的锁模原理为: 在激光器连续工作情况下, 微小的超短脉冲经过偏振相关隔离器后, 在起偏器的作用下变成线偏振光。从控制器 PC1 出来变成了两束椭圆偏振光, 这两束光互相垂直, 在相位上存在一定量的延迟。利用掺 Er³⁺ 光纤的放大特性, 在自相位调制效应、光克尔效应和交叉相位调制等单模光纤的非线性效应的影响下, 光纤内偏振的方向发生偏转, 脉冲的峰值部分和边翼有了不同的相位延迟, 从而经 PC2 还原为线偏振光后具有不同的偏振态。通过旋转 PC2, 使脉冲峰值部分在分束器处的透过率达到最大, 而边翼部分的透过率较小。经过多个周期的变窄和放大作用之后, 产生了超短的脉冲输出。

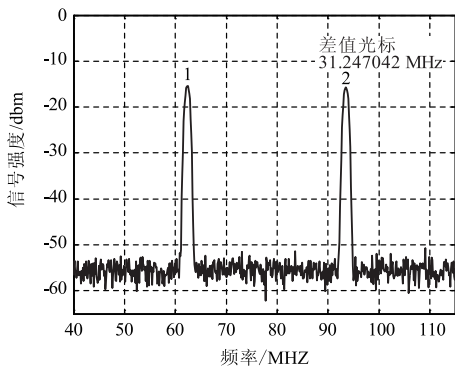
2 实验结果与讨论

实验中, 通过逐渐提高泵浦功率, 在达到锁模阈值之后调整激光器内偏振控制器, 直到激光器产生长时间保持稳定状态的锁模激光脉冲。图 3 是通过高速光电探测器后, 连接到频谱仪上所得到的输出脉冲的频率, 可以看出其频率间隔稳定, 锁模状态良好, 从图 3(b) 上还可以得到激光器输出的重复频率为 31.25 MHz。该重复频率还有很大的优化空间。如果减小或

者消除扰动和背向反射，在实验环境中激光器可以稳定工作长达数十小时。



(a) 重复频率



(b) 频率差值

图3 重复频率特性图

图4是在最高输出功率下，利用自相关仪测量未经过压缩的输出脉宽。实验中所测到的最短的自相关信号的FWHM为273 fs，由自相关轨迹的宽度与原始脉冲之间宽度的对应关系可知，假设脉冲形状为双曲正割情况下，原始脉冲的最短宽度为163 fs。

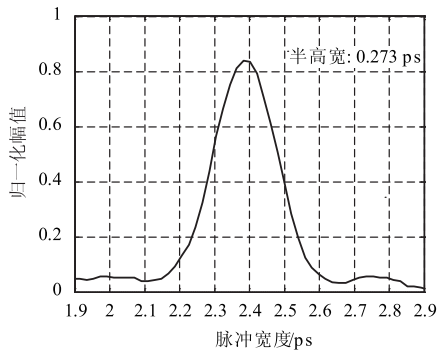


图4 自相关曲线图

图5为激光器产生连续稳定振荡锁模激光脉冲并且输出功率最大时，用光谱仪所测量的结果。从图5中可以得知，光谱曲线平滑。中心波长为1565 nm，光谱的半高全宽为50 nm。

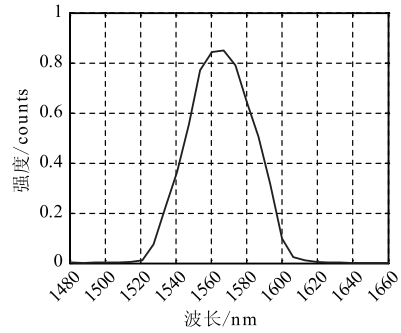


图5 光谱曲线

最后，测量了在实验过程中输出功率和泵浦功率的关系。当泵浦功率最大时，保证有长时间稳定的脉冲输出。通过依次降低泵浦功率，测量激光的平均功率，结果如图6所示。当泵浦源在最大输出功率650 mW的情况下，其稳定的锁模脉冲输出功率为70 mW，具有较高的转换率，其效率为12.5%。泵浦功率高于260 mW时，激光产生稳定的锁模输出。一旦出现锁模，泵浦功率降低到230 mW仍能保持锁模状态。

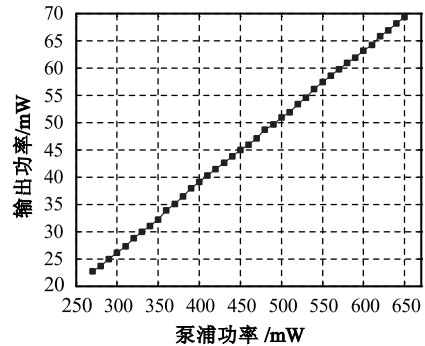


图6 输出功率与泵浦功率关系

3 结论

实验测得掺 Er³⁺ 光纤飞秒激光器的重复频率为31.25 MHz，光谱的中心波长为1565 nm，光谱半高全宽为50 nm，输出的最大功率为70 mW。并且观察到了稳定的谐波锁模。使用自相关仪测量飞秒激光的脉冲，直接测量脉冲的时域宽度为163 fs。参考实验结果和理论数据的仿真，采用高掺杂 Er³⁺ 光纤、高功率980 nm激光泵浦源和由光纤熔接的环形腔，缩短激光器的腔长、提高重复频率、控制重复频率漂移、提高输出功率，最终的结果满足设计的要求。

参考文献

[1] Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe[J]. Optics letters, 2004, 29(10): 1153-1155.

(下转第53页)

表1 水流量测量值

序号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	上偏差	下偏差
左叶片	G ₂ 一次	32.1	31.7	32.3	33.0	32.1	33.2	33.1	32.6	33.2	33.1	32.64	1.72	-2.88
	G ₂ 二次	32.2	31.6	32.3	33.1	32.2	33.1	33.1	32.5	33.1	33.0	32.62	1.47	-3.13
	G ₃ 一次	16.5	17.7	18.0	17.7	17.3	17.4	17.2	18.0	17.8	18.0	17.56	2.51	-6.04
	G ₃ 二次	16.6	17.7	18.1	17.7	17.2	17.3	17.2	18.1	17.7	18.1	17.57	3.02	-5.52
右叶片	G ₂ 一次	29.7	30.1	31.3	30.6	30.3	32.9	30.9	31.0	32.6	30.4	30.98	6.20	-4.13
	G ₂ 二次	29.9	30.2	31.2	30.7	30.3	32.8	30.8	31.1	32.6	30.5	31.01	5.77	-3.58
	G ₃ 一次	17.2	17.6	17.0	17.4	16.8	16.8	17.3	17.4	17.9	17.9	17.33	3.29	-3.06
	G ₃ 二次	17.2	17.7	16.9	17.3	16.9	16.8	17.2	17.3	17.9	18.0	17.32	3.93	-3.00

表2 两次重复测量误差

叶片 序号	左叶片误差/%		右叶片误差/%	
	G ₂	G ₃	G ₂	G ₃
1	0.31	0.61	0.67	0.00
2	-0.32	0.00	0.33	0.57
3	0.00	0.56	-0.32	-0.59
4	0.30	0.00	0.33	-0.57
5	0.31	-0.58	0.00	0.60
6	-0.30	-0.57	-0.30	0.00
7	0.00	0.00	-0.32	-0.58
8	-0.31	0.56	0.32	-0.57
9	-0.30	-0.56	0.32	0.00
10	-0.30	0.56	0.33	0.56

从表1中可以看出,同一批次10件高导叶片的左右叶片水流量上偏差最大值为6.20%,下偏差最大值为6.04%,符合分散度小于±15%的设计要求;从表2可以看出,10件高导叶片的左右叶片水流量先后两次的重复测量误差最大为0.67%,达到了重复测量误差不大于±1%的设计指标,满足了涡轮叶片水流量测量要求。

4 结论

1)在水流量测试系统中采用闭环系统控制可实现试验器系统自动调压、稳压,有助于降低重复测量误差;增加当量回路设计,可以大大缩短系统调压、稳

压时间,提高试验效率。

2)叶片与夹具之间,仅仅在入口边沿部位封严无法达到密封效果;采用整体密封装置,按缘板外型进行随型密封,增加密封垫的有效密封区域,可有效解决因密封端面结构复杂,局部密封造成泄露或截流的现象。

3)对双联组叶片来说,采用具有四个进水口的夹具可有效提高水流量测量的准确性和效率。

参 考 文 献

[1] 倪萌,朱惠人,裘云,等. 发动机涡轮叶片冷却技术综述[J]. 燃气机技术, 2005, 18(4): 25-31.
 [2] 廉筱纯,吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2001: 101-104.
 [3] 江龙平,徐可君,隋育松. 涡轮叶片冷却技术的应用和发展[J]. 海军航空工程学院学报, 2002, 17(1): 129-132.
 [4] 张庆,孟光. 涡轮叶片冷却数值模拟进展[J]. 燃气机技术, 2004, 17(4): 23-27.
 [5] 李庆刚,彭荣强. 涡轮叶片冷却U型通道设计[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(2): 92-94.
 [6] 曹志廷,郭文,潘炳华,等. 涡轮叶片冷却设计优化方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25(4): 30-36.
 [7] 侯毅,朱岩,柴艳丽. 流量现场校准装置测量误差分析及修正[J]. 计测技术, 2010, 30(3): 41-43.
 [8] 陈敏. 影响现场流量测量结果的主要原因分析[J]. 计测技术, 2010, 30(S0): 114-116.

(上接第29页)

[2] Cundiff Steven T, Ye Jun. Colloquium: Femtosecond optical frequency combs [J]. REVIEWS OF MODERN PHYSICS, 2003, 75(1): 325-342.
 [3] Cundiff Steven T, Ye Jun, Hall John L. Optical frequency synthesis based on mode-locked lasers [J]. Rev. Sci. Instrum, 2001, 72(10): 3749-3771.
 [4] 邓定桓. 飞秒掺铒光纤激光器[D]. 上海:上海交通大学, 2010.
 [5] 郑瑶雷,赵卫,王贤华,等. 掺Er~(3+)飞秒光纤放大器的特性研究[J]. 光子学报, 2004, 33(3): 268-271.

[6] 胡巍,陈国夫,刘东峰,等. 飞秒光纤激光器[J]. 光子学报, 1996, 25(3): 260.
 [7] 刘东峰,陈国夫. 高功率飞秒全固化光纤激光器与放大器系统实用化的超快光源[J]. 激光与光电子学进展, 1999(1): 1-8.
 [8] 李力舟,白晶,张伟,等. 高重复率全光纤被动锁模飞秒激光产生研究[J]. 量子电子学报, 2009(4): 413-416.
 [9] 韩国华,洪新华. 被动锁模光纤激光器多孤子脉冲形成机理[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(2): 8-12.