

掺 Yb^{3+} 双包层大模场面积光纤锁模激光器^{*}

宋有建¹⁾ 胡明列^{1)†} 刘庆文¹⁾ 李进延²⁾
陈 伟^{2)B)} 柴 路¹⁾ 王清月¹⁾

1) 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

2) 华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430073)

3) 武汉烽火通信科技股份有限公司, 武汉 430074)

(2007 年 9 月 17 日收到, 2008 年 1 月 29 日收到修改稿)

报道了一种结构简单、运转稳定并可以输出高脉冲能量的被动锁模光纤激光器. 激光器的增益介质为掺 Yb^{3+} 双包层大模场面积光纤, 具有非常低的非线性系数. 利用非线性偏振旋转效应和半导体可饱和吸收镜结合实现自启动锁模, 获得了平均功率为 160 mW、重复频率为 55.9 MHz(对应于 3 nJ 的单脉冲能量)、脉冲宽度为 10.6 ps 的激光脉冲输出.

关键词: 大模场面积光纤, 光纤激光器, 锁模

PACC: 4281W, 4280W, 4260D

1. 引 言

近年来, 利用被动锁模的掺 Yb^{3+} 光纤激光器产生超短脉冲在国际上成为研究的热点之一. 掺 Yb^{3+} 光纤具有足以支持皮秒、飞秒量级的激光脉冲产生的增益带宽, 同时具有很高的抽运光转换效率, 并且可以利用商用激光二极管(LD)直接抽运. 再加上光纤激光器固有的环境稳定性高、结构紧凑、散热效果好等优势, 使得掺 Yb^{3+} 光纤锁模激光器在超快光谱学、光通信、微纳加工等诸多领域中得到了广泛的应用. 但是, 长期以来, 光纤激光器输出的超短脉冲的平均功率、单脉冲能量等技术指标却无法与传统的固体激光器相比. 这是因为超短激光脉冲在光纤中传输时积累与光强成正比的非线性相移, 并在光纤色散的作用下引起脉冲畸变^[1], 从而限制了脉冲能量的提高. 对于普通的孤子锁模光纤激光器, 受到孤子面积的限制, 输出的单脉冲能量仅在 10 pJ 量级^[2]. 通过引入腔内色散管理, 使激光器工作在呼吸孤子锁模域^[3]或自相似锁模域^[4], 可以有效地降低

脉冲峰值功率, 从而提高单脉冲能量. 如果不引入任何色散补偿机制, 光纤激光器工作在全正色散锁模^[5]域, 这虽然会限制脉冲宽度的压缩, 却可以进一步提高单脉冲能量.

双包层光纤允许大功率 LD 直接进行包层抽运, 具有很高的抽运光-激光转换效率, 连续波运转的双包层光纤激光器已经实现了很高的平均功率输出. 近年来, 国际上相继出现了高能量双包层光纤锁模激光器的报道^[6-9]. 在一个基于掺 Yb^{3+} 普通双包层光纤的自相似锁模实验中, 得到了平均功率为 75 mW、单脉冲能量为 3.2 nJ、脉冲宽度为 6.4 ps 的超短脉冲输出, 经过腔外色散补偿, 脉冲宽度压缩至 140 fs^[7]. 基于包层抽运技术的掺 Yb^{3+} 空气包层大模场面积光子晶体光纤具有极低的非线性系数, 同时能够保证单模运转. Ortac 等^[8]利用这种光纤率先实现了全正色散锁模. 实验中所选用光纤的纤芯直径达 70 μm , 获得了平均功率为 2.7 W、单脉冲能量为 265 nJ、脉冲宽度为 4 ps 的超短脉冲输出, 经腔外色散补偿, 脉冲宽度可以压缩至 400 fs.

国内在包层抽运的锁模光纤激光器研究领域起

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2003CB314904, 2006CB806002)、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: 50678012)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20070056083, 20070056073)和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

步较晚,也曾实现了双包层光纤激光器的调 Q 锁模运转^[10].本文利用国产单层空气孔结构的掺 Yb^{3+} 双包层大模场面积光纤实现全正色散锁模,采取非线性偏振旋转效应和半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorber mirror, 简记为 SESAM)结合的方式^[11]实现锁模的自启动,获得了平均功率为 160 mW、单脉冲能量为 3 nJ、脉冲宽度为 10.6 ps 稳定的超短脉冲输出.

2. 实验装置

掺 Yb^{3+} 双包层大模场面积光纤锁模激光器的实验装置如图 1 所示.光纤耦合输出的大功率 LD 作为抽运源,输出尾纤直径为 $200\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22,中心波长为 976 nm,最大输出功率为 30 W.双色镜 M_1 用于分离激光与抽运光,对波长为 976 nm 的抽运光透过率大于 95%,对波长在 1020—1090 nm 范围内的激光的反射率达到 99%.抽运光经焦距为 11 mm 的非球面透镜 L_1 准直,透过双色镜,由焦距为 8 mm 的非球面透镜 L_2 耦合至双包层大模场面积

光纤中.光纤长度为 1.5 m,由武汉烽火通信科技股份有限公司拉制,其截面如图 2 所示.光纤的高掺杂浓度增益纤芯的直径为 $35\ \mu\text{m}$,光纤内包层直径为 $315\ \mu\text{m}$,外包层采用单层支撑壁空气孔结构,可以使内包层获得更高的数值孔径,从而增加抽运光的吸收效率.光纤外径(不包括涂覆层)为 $520\ \mu\text{m}$.为了防止端面反馈形成自激振荡,影响锁模运转,光纤的两个端面均打磨成 8° .实验中光纤弯曲直径为 20 cm,起到抑制高阶模式的作用.激光器采用简单的驻波腔结构,两个腔镜分别为全反镜和 SESAM. SESAM 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.在 1040 nm 附近的线性吸收率为 30%,调制深度为 20%,饱和通量为 $120\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$,吸收恢复时间小于 500 fs.激光被焦距为 18.4 mm 的非球面透镜 L_4 聚焦至 SESAM 的吸收层,通过改变会聚光斑的尺寸,获得启动锁模所需的能量密度.在全反镜一端的自由光路中依次插入四分之一波片、半波片和偏振分束器,实现非线性偏振旋转^[12],起到快可饱和吸收体的作用.偏振分束器的导出端作为激光耦合输出.

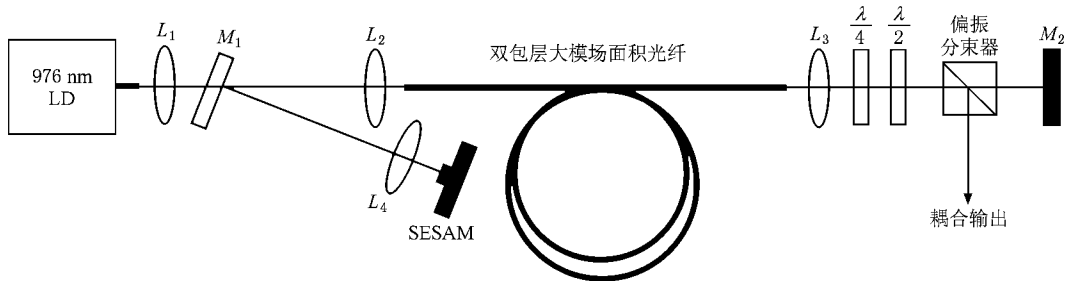


图 1 双包层大模场面积光纤锁模激光器实验装置示意图

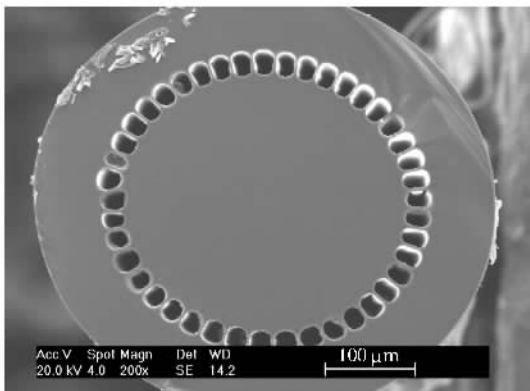


图 2 双包层大模场面积光纤截面的扫描电子显微镜照片

3. 实验结果

提高抽运功率使激光器达到锁模阈值,然后通过旋转两个波片,并精确控制 SESAM 上的光斑尺寸,可以获得稳定的连续波锁模.锁模时域脉冲序列如图 3 所示,其重复频率为 55.9 MHz.锁模状态可以持续十几个小时,且每次重新打开激光器时锁模可以自启动.利用光束质量分析仪测量的输出端的光斑模场分布如图 4 所示.从图 4 可以看出,激光光束具有非常好的基模分布.激光器输出的平均功率为 160 mW,对应的单脉冲能量为 3 nJ.继续增加抽运功率,锁模脉冲序列依然稳定且没有出现多脉冲的

迹象, 不过 SESAM 很快由于热损伤而失去可饱和吸收作用. 由此可知, SESAM 的破坏阈值限制了激光器输出平均功率和单脉冲能量的进一步提高. 为获得更大的能量输出, 用全反镜代替 SESAM 作为腔镜, 尝试通过非线性偏振旋转实现锁模. 但是, 实验中没有发现任何锁模的迹象. 这是因为大模场面积光纤的长度比较短, 由光纤中两个正交偏振态的非线性相移引起的非线性偏振旋转效应不足以使激光器获得启动锁模所需的调制度.

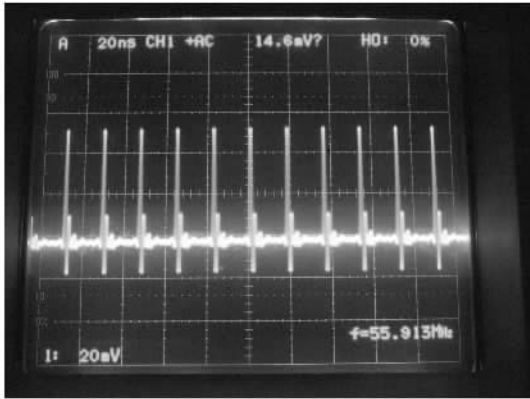


图 3 激光器输出的锁模脉冲序列

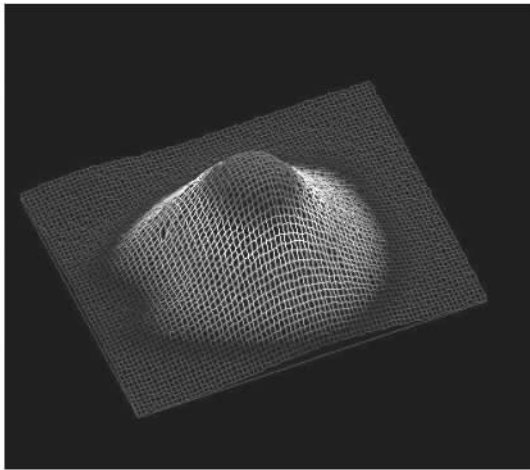


图 4 激光器输出的光斑模场分布

测量得到的锁模状态的输出端激光光谱如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 激光的中心波长为 1079.32 nm, 光谱的 3 dB 带宽为 0.2 nm, 光谱形状具有轻微的不对称. 利用实验室自制的扫描范围为 100 ps 的自相关器测量脉冲宽度并监视子脉冲. 实验测得的输出脉冲的自相关曲线如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 自相关曲线宽度为 15 ps, 与高斯函数符合很好,

对应的实际脉冲宽度为 10.6 ps. 自相关曲线没有基底及边带, 证明光纤激光器具有很高的信噪比, 并且处于严格的单脉冲运转状态. 输出激光的时间带宽积为 0.55, 说明激光脉冲接近于傅里叶变换极限且具有轻微的正啁啾. 由于 SESAM 的破坏阈值较低, 激光的单脉冲能量很难继续提高, 这限制了激光光谱的非线性展宽和脉冲宽度的进一步窄化.

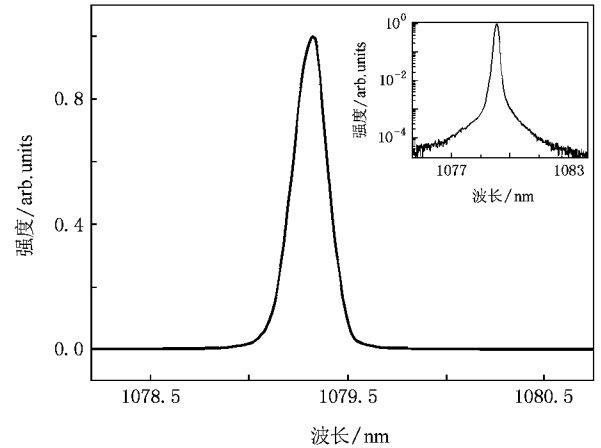


图 5 激光器的输出光谱 内插图是对数坐标下的输出光谱

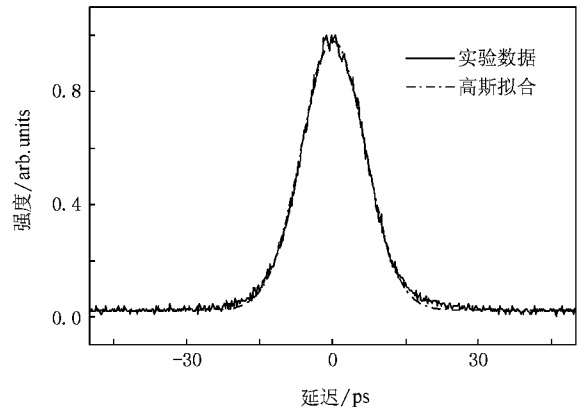


图 6 激光器输出脉冲的自相关曲线

4. 结 论

实验研究了掺 Yb^{3+} 双包层大模场面积光纤激光器的全正色散锁模. 激光器基于结构简单的驻波腔, 而且不引入任何色散补偿元件, 增强了实用性和稳定性. 利用非线性偏振旋转效应和 SESAM 的共同作用实现自启动锁模. 实验中得到脉冲宽度为 10.6 ps、重复频率为 55.9 MHz、平均功率为 160 mW、单脉冲能量为 3 nJ 的超短脉冲输出, 已经接近于普通固

体激光器的输出指标. 由于锁模稳定、输出平均功率高且脉冲较宽, 这种激光器非常适合作为光纤激光放大系统的种子源.

- [1] Anderson D , Desaix M , Lisak M , Quiroga-Teixeiro M L 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 1358
- [2] Tamura K , Nelson L E , Haus H A , Ippen E P 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 149
- [3] Buckley J R , Wise F W , Ilday F Ö , Sosnowski T 2005 *Opt. Lett.* **30** 1888
- [4] Ilday F Ö , Buckley J R , Clark W G , Wise F W 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 213902
- [5] Herda R , Okhotnikov O G 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 893
- [6] Ortac B , Hideur A , Chartier T , Brunel M , Özkul C , Sanchez F 2003 *Opt. Lett.* **28** 1305
- [7] Ortac B , Hideur A , Chedot C , Brunel M , Martel G , Limpert J 2006 *Appl. Phys. B* **85** 63
- [8] Ortac B , Schmidt O , Schreiber T , Limpert J , Tümmermann A , Hideur A 2007 *Opt. Express* **15** 10725
- [9] Ortac B , Limpert J , Tümmermann A 2007 *Opt. Lett.* **32** 2149
- [10] Wang Y G , Ma X Y , Fu S G , Fan W D , Li Q , Yuan S Z , Dong X Y , Song Y R , Zhang Z G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1810 (in Chinese)[王勇刚、马晓宇、付圣贵、范万德、李强、袁树忠、董孝义、宋晏蓉、张志刚 2004 物理学报 **53** 1810]
- [11] Lefort L , Price J H V , Richardson D J , Spühler G J , Paschotta R , Keller U , Fry A R , Weston J 2002 *Opt. Lett.* **27** 291
- [12] Hofer M , Fermann M E , Haberl F , Ober M H , Schmidt A J 1991 *Opt. Lett.* **16** 502

A mode-locked Yb³⁺-doped double-clad large-mode-area fiber laser^{*}

Song You-Jian¹⁾ Hu Ming-Lie^{1)†} Liu Qing-Wen¹⁾ Li Jin-Yan²⁾
Chen Wei^{2)‡} Chai Lu¹⁾ Wang Qing-Yue¹⁾

1) *Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education , College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China*

2) *School of Optoelectronics Science and Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430073 , China*

3) *Fiber Home Telecommunication Technologies Company Limited , Wuhan 430074 , China*

(Received 17 September 2007 ; revised manuscript received 29 January 2008)

Abstract

A compact and highly stable high pulse energy passively mode-locked fiber laser is presented. A segment of Yb³⁺-doped double-clad large-mode-area fiber with extremely low nonlinearity is developed as the active medium. The self-starting mode-locked operation is achieved by the cooperation of nonlinear polarization evolution and semiconductor saturable-absorber mirror. The fiber laser generates laser pulses with the average power of 160 mW at the repetition rate of 55.9 MHz (corresponding to pulse energy of 3 nJ) , and the pulse duration is 10.6 ps.

Keywords : large-mode-area fiber , fiber laser , mode locking

PACC : 4281W , 4280W , 4260D

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2003CB314904 , 2006CB806002) , the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z447) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60678012) , the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant Nos. 20070056083 , 20070056073) and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education , China (Grant No. NCET-07-0597) .

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