

147 fs碳纳米管倏逝场锁模全光纤掺铒光纤激光器*

董信征 于振华 田金荣[†] 李彦林 窦志远 胡梦婷 宋晏蓉[‡]

(北京工业大学微纳信息光子技术研究所, 应用数理学院, 北京 100124)

(2013年9月15日收到; 2013年9月29日收到修改稿)

利用化学腐蚀法在光纤包层表面成功制备了调制深度为3.9%的单壁碳纳米管饱和吸收体. 组建了环形腔结构的全光纤掺铒光纤激光器, 以制备的单壁碳纳米管薄膜为锁模元件, 利用倏逝场锁模实现了锁模输出. 锁模脉冲的中心波长为1556 nm, 3 dB光谱带宽为24 nm, 脉冲宽度为147 fs, 重复频率为150 MHz. 在520 mW抽运功率下, 平均输出功率为21 mW, 相应的单脉冲能量为0.14 nJ.

关键词: 掺铒光纤, 全光纤激光器, 单壁碳纳米管, 倏逝场**PACS:** 42.55.Wd, 42.65.Re**DOI:** 10.7498/aps.63.034202

1 引言

锁模光纤激光器既具有结构紧凑, 高效稳定的优点, 又具有短脉宽、高重复频率、高平均功率、高脉冲能量等特点, 在光通信、精密仪器加工、非线性光学和生物医学诊断等领域^[1-4]具有重要的应用价值, 是激光器研究的热点之一. 光纤激光器可通过多种手段实现锁模, 其中半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) 作为重要的锁模器件^[5], 已广泛用于固体及光纤激光器^[6-9]. 但是 SESAM 制备工艺较为复杂, 价格较高, 工作波段有限, 抗损伤阈值较低. 此外, SESAM 与光纤之间耦合损耗比较大, 限制了光纤激光器的功率的提高, 而且不利于实现全光纤结构. 单壁碳纳米管 (single-walled carbon nanotubes, SWCNT) 是近年来兴起的新型锁模器件, 它响应时间短 (< 800 fs), 工作波段宽 (300—2300 nm), 是理想的锁模器件^[10]. SWCNT 辅助实现锁模的形式有两种: 1) 穿透或反射式, 也就是将 SWCNT 饱和吸收体置于激光器谐振腔中, 让激

光在 SWCNT 中穿透或反射实现锁模. 目前采用 SWCNT 穿透式锁模已在光纤激光器中获得光谱宽度为 63 nm, 脉冲宽度为 74 fs 的脉冲激光^[11]; 2013 年 Liu 等利用 SWCNT 穿透式锁模在掺铒光纤中获得了 6 ps 的多波长锁模脉冲输出^[12]; 2) 倏逝场锁模模式, 即 SWCNT 不插入主光路, 只是覆盖在光纤包层表面, 激光通过与包层中传导模的倏逝场作用实现锁模. 2008 年 Song 等利用倏逝场锁模在掺铒光纤激光器中实现脉冲 470 fs 的脉冲输出^[13], 2010 年 Im 等将 SWCNT 用于倏逝场锁模, 获得了 55.6 mW, 5.8 ps 的稳定锁模输出^[14]. 2013 年王莎莎等利用 V 形槽单模光纤制备 SWCNT 饱和吸收体, 在掺铒光纤中获得 336 mW, 93.8 fs 的锁模输出^[15]. 两种锁模方法的区别在于: 1) 有效作用长度不同, 倏逝场锁模的有效作用长度比穿透式锁模的作用长度大, 可增强饱和吸收体的调制^[16]; 2) 把碳纳米管放在两个光纤对接处, 激光完全穿透吸收体薄膜, 其损伤阈值比较低. 倏逝场则避免了腔内的热效应, 间接提高了饱和吸收体的抗损伤阈值, 延长了锁模激光器的工作时间, 对高功率激光

* 国家自然科学基金 (批准号: 61177047) 和国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61235010) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: jrtian@bjut.edu.cn[‡] 通讯作者. E-mail: yrsong@bjut.edu.cn

较为有利. 本文采用化学腐蚀法制备了SWCNT锁模器件, 利用倏逝场锁模, 在全光纤掺铒光纤激光器中获得了脉冲宽度 147 fs, 3 dB 光谱宽度 24 nm 的锁模脉冲输出.

2 单壁碳纳米管可饱和吸收体的制备

本实验采用化学腐蚀法制备SWCNT可饱和吸收体. 用光纤钳将普通单模光纤的涂覆层去掉, 并记录下来该长度. 利用氢氟酸(HF)腐蚀玻璃, 不腐蚀有机物的原理, 来腐蚀裸露的包层, 腐蚀光纤的长度约为 4 cm. 用 40% 浓度的氢氟酸, 腐蚀光纤的包层, 剩余包层直径为 44.9 μm . 然后称量 5 mg 的单壁碳纳米管固体颗粒, 放入 20 mL 的去离子水中, 超声 5 h 后, 放入离心机去掉杂质, 得到纯净的碳纳米管溶液. 取一定量的 PVA 溶液加入碳纳米管溶液中, 再超声 5 h, 使其混合均匀, 然后将该溶液滴涂到刻蚀后的光纤区域, 烘干, 可以清楚看到腐蚀部分上面有一层黑色薄膜, 表明成功制备了单壁碳纳米管饱和吸收体.

我们根据文献 [17, 18] 的方法, 对饱和吸收体的调制深度进行了测量. 将含碳纳米管饱和吸收体的光纤两端分别与用 1550 nm 的飞秒探测光源和功率计相连接, 测量非线性透过率随探测光功率变化的关系, 结果如图 1 所示. 随着探测光功率的增加, 透过率趋于定值, 可以得到调制深度约为 3.9%.

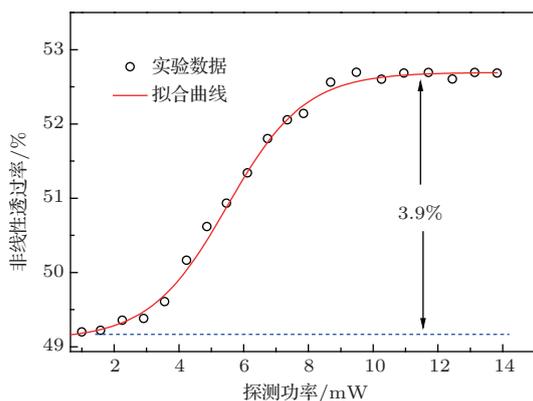


图 1 非线性透过率随探测功率的关系

3 倏逝场锁模全光纤掺铒光纤激光器

将碳纳米管饱和吸收体放入环形腔掺铒光纤激光腔中, 形成全光纤结构的光纤激光器, 如图 2 所示. 其中抽运源为 980 nm 半导体激光器, 最

大输出功率为 520 mW. WDM 为波分复用器, 用于将抽运光注入掺铒光纤. EDF 为掺铒光纤 (Er-110-4/125, Liekki), 长度约为 0.4 m, 在 980 nm 处纤芯吸收率为 60 dB/m. PC 为偏振控制器, 通过应力挤压光纤, 来控制腔内激光的偏振状态. ISO 为隔离器, 用于实现腔内激光单向传输, 有利于锁模激光的形成. SA 为制备的单壁碳纳米管饱和吸收体. OC 为输出耦合器, 分束比为 20/80, 20% 一端作为激光输出. 激光输出后通过隔离器, 从而防止激光从输出端面形成部分反射, 影响锁模激光的稳定性. 整个环形腔的腔长约为 1.4 m.

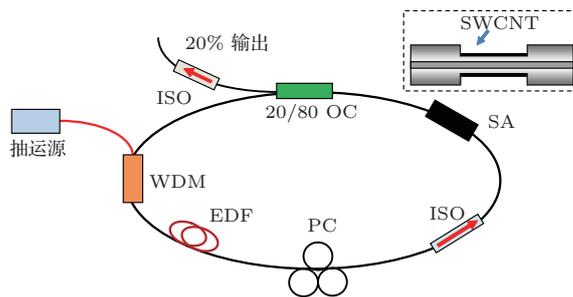


图 2 掺铒光纤激光器结构示意图

4 实验结果及分析

当抽运光功率为 40 mW 时, 激光实现振荡, 中心波长为 1553 nm. 继续增大抽运光功率, 并微调偏振控制器, 当抽运光功率为 280 mW 时, 实现了稳定的自启动连续锁模, 功率为 10.9 mW. 图 3 为示波器 (Infiniium 54833A, Agilent) 测得的锁模脉冲序列, 脉冲序列非常稳定, 相邻脉冲之间的时间间隔约为 6.7 ns, 对应的重复频率约为 150 MHz, 与激光器的腔长相符合, 可确认为锁模状态.

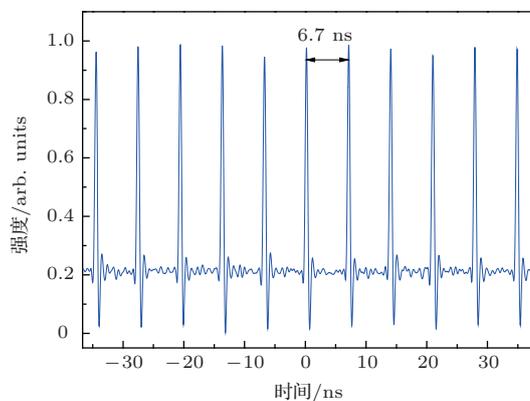


图 3 测得的锁模脉冲序列

对锁模脉冲的输出功率进行了测量, 实验结果如图 4 所示. 可以看到锁模脉冲的平均输出功率随着抽运光功率基本线性增大. 对数据的拟合结果显示, 输出功率的斜效率约为 4%, 不够理想. 我们认为这是由于将包层腐蚀, 部分光不能维持在纤芯内部的全反射, 导致一部分光泄露, 造成损耗. 如果更精确的控制腐蚀过程和腐蚀长度, 此损耗可减小, 斜效率也可以相应提高. 当抽运功率达到最大值 520 mW 时, 激光仍维持稳定的连续锁模状态, 未观察到脉冲分裂或者多脉冲现象. 此时平均输出功率为 21 mW, 相应的单脉冲能量约为 0.14 nJ, 已经超过了传统孤子的结果 [19,20]. 我们认为这是由于激光器中增益光纤提供的是正色散 ($7 \text{ ps}^2/\text{km}$), 普通单模光纤提供的是负色散 ($-22 \text{ ps}^2/\text{km}$), 是典型的色散管理孤子锁模. 与传统孤子不同, 色散管理孤子脉冲在时域上产生周期性的展宽和压缩, 可以减小非线性效应的积累, 使得普通单模光纤激光器单脉冲能量可以超过 0.1 nJ. 文献 [13, 18] 的净色散为负值, 脉冲能量都可以超过 0.1 nJ. 本文实验亦证实了这一点.

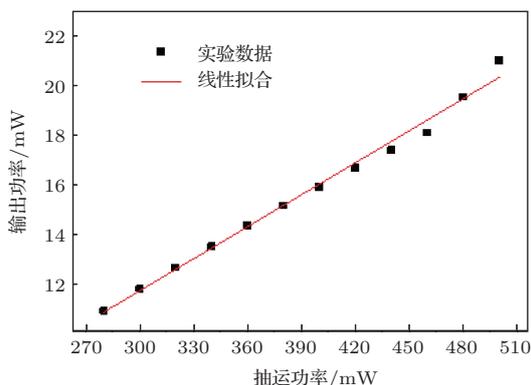


图 4 输出功率随抽运功率的变化

用光谱分析仪 (AQ6317B, Ando) 测量了锁模脉冲的光谱, 结果如图 5 所示. 可以看出锁模脉冲光谱的中心波长为 1556 nm, 3 dB 光谱带宽为 24 nm, 理论上支持 105 fs 的脉冲宽度 (假设脉冲为双曲正割型). 腔内色散分析结果表明, 整个腔长净色散量为负值, 以致激光器工作在负色散状态, 所以光谱图呈现出孤子锁模特征, 并且出现了三级边带.

对锁模脉冲的脉冲宽度进行了测量. 图 6 为自相关仪 (FR-103XL, Femtochrome) 测得的锁模脉冲的自相关信号. 从图中测得其半高全宽为 230 fs, 在双曲正割脉冲近似下, 脉冲宽度为 147 fs. 对应

的时间带宽积约为 0.437, 超过 0.315 的傅里叶变换极限, 说明脉冲含有啁啾. 如果在腔外对脉冲进行色散补偿, 可以进一步压缩脉宽.

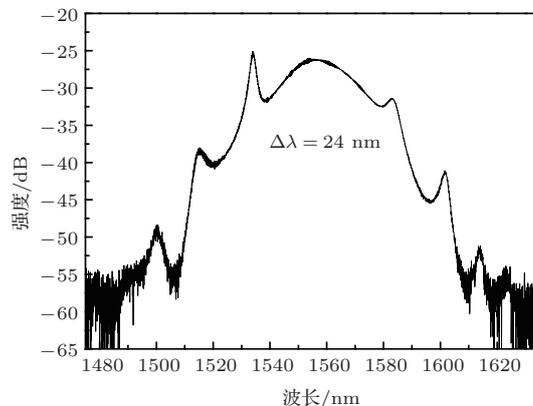


图 5 锁模脉冲的光谱

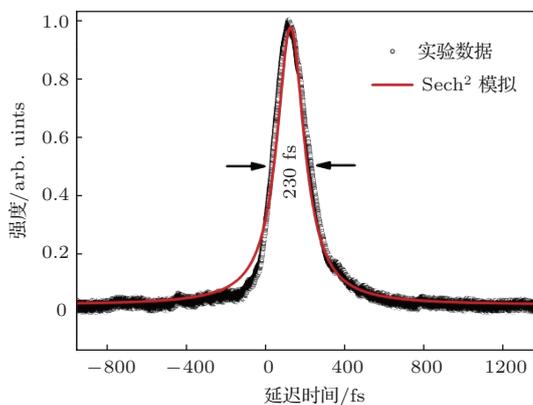


图 6 锁模脉冲的自相关轨迹

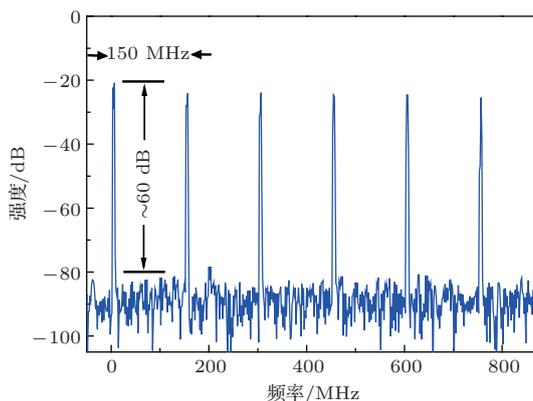


图 7 锁模脉冲的频谱图

采用频谱分析仪 (E4447A, Agilent) 测量锁模脉冲的频谱, 结果如图 7 所示. 可以看到锁模脉冲的重复频率为 150 MHz, 和示波器测量的结果一

致. 也可看出锁模脉冲的信噪比为 60 dB, 表明锁模非常稳定. 为进一步检验锁模的稳定性, 我们对激光器的输出光谱、输出功率进行了长达 72 h 的不间断测量, 未发现明显波动, 显示了倏逝场锁模光纤激光器良好的稳定性.

5 结 论

本文采用化学腐蚀方法制备了单壁碳纳米管可饱和吸收体. 采用环形腔组建了全光纤结构的掺铒光纤激光器, 利用倏逝场锁模实现了锁模脉冲输出. 在中心波长 1556 nm 处, 获得了脉宽 147 fs, 重复频率为 150 MHz 的激光脉冲. 在最大抽运功率 520 mW 下, 输出功率为 21 mW, 单脉冲能量为 0.14 nJ. 结果表明, 利用化学腐蚀法可以制备性能良好的单壁碳纳米管饱和吸收体, 并可利用该饱和吸收体实现稳定的倏逝场锁模. 由于碳纳米管饱和吸收体不插入主光路, 有效避开了光纤内高能量的激光, 使得该饱和吸收体的抗损伤阈值比较高, 可以长时间稳定工作. 对提高光纤激光器的输出功率和稳定性有重要的价值.

参考文献

- [1] Sun Z, Ferrari A C 2011 *Nat. Photonics* **5** 446
- [2] Letokhov V S 1985 *Nature* **316** 325
- [3] Li Y F, Hu M L, Wang C Y, Zheltikov A M 2006 *Opt. Express* **14** 10878

- [4] Jiang T X, Wang G Z, Zhang W, Li C, Wang A M, Zhang Z G 2013 *Opt. Lett.* **38** 443
- [5] Jacobovitz-Veselka G R, Keller U 1992 *Opt. Lett.* **17** 1791
- [6] Li J F, Liang X Y, He J P, Lin H 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 071406
- [7] Guo L, Hou W, Zhang H B, Sun Z P, Cui D, Xu Z, Wang Y G, Ma X Y 2005 *Opt. Express* **13** 4085
- [8] Zhu J F, Tian J R, Wang P, Ling W J, Li D H, Wei Z Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2022
- [9] Song Y J, Hu M L, Xie C, Chai L, Wang C Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7105 (in Chinese)[宋有建, 胡明列, 谢辰, 柴路, 王清月 2010 物理学报 **59** 7105]
- [10] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, Ferrari A C 2010 *Nat. Photonics* **4** 611
- [11] Popa D, Sun Z, Hasan T, Cho W B, Wang F, Torrisi F, Ferrari A C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 153107
- [12] Liu X M, Han D D, Sun Z P, Zeng C, Lu H, Mao D, Cui Y D and Wang F Q 2013 *Sci. Rep.* **3** 2718
- [13] Song Y W, Yamashita S, Maruyama S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 021115
- [14] Im J H, Choi S Y, Rotermund F 2010 *Opt. Express* **18** 18264
- [15] Wang S S, Pan Y Z, Gao R X, Zhu X F, Su X H, Qu S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **62** 024209 (in Chinese) [王莎莎, 潘玉寨, 高仁喜, 祝秀芬, 苏晓慧, 曲士良 2008 物理学报 **62** 024209]
- [16] Song Y W, Yamashita S 2007 *Opt. Lett.* **32** 148
- [17] He X Y, Liu Z B, Wang D N, Yang M W, Liao C R, Zhao X 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 984
- [18] Kieu K, Mansuripur M 2007 *Opt. Lett.* **32** 2242
- [19] Liu X M 2011 *Phys. Rev. A* **84** 023835
- [20] Liu X M 2011 *Phys. Rev. A* **84** 053828

A 147 fs mode-locked erbium-doped fiber laser with a carbon nanotubes saturable absorber in evanescent field*

Dong Xin-Zheng Yu Zhen-Hua Tian Jin-Rong[†] Li Yan-Lin Dou Zhi-Yuan
Hu Meng-Ting Song Yan-Rong[‡]

(*Institute of Information Photonics Technology, College of Applied Sciences, Beijing University of Technology,
Beijing 100124, China*)

(Received 15 September 2013; revised manuscript received 29 September 2013)

Abstract

A saturable absorber of 3.9% modulation depth was prepared on the surface of a fiber clad with single-walled carbon nanotubes (SWCNT) using chemical corrosion method. An all-fiber Er-doped fiber laser was setup with a ring cavity, and was mode-locked successfully by evanescent field mode-locking using prepared saturable absorber of single-walled carbon nanotubes. A 147 fs mode-locking pulse is obtained near 1556 nm with a 3 dB bandwidth of 24 nm. The output power is 21 mW at a pump power of 520 mW, corresponding to a pulse energy of 0.14 nJ with a repetition rate of 150 MHz.

Keywords: Er-doped fiber, all-fiber laser, SWCNT, evanescent field

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.63.034202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61177047), and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61235010).

[†] Corresponding author. E-mail: jrtian@bjut.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: yrsong@bjut.edu.cn