

基于单壁碳纳米管的多波长被动锁模激光器

宋秋艳¹ 陈根祥² 谭晓琳¹ 田 恺¹

(¹ 北京交通大学光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)
² 中央民族大学理学院, 北京 100081)

摘要 提出了一种基于单壁碳纳米管/聚酰亚胺复合材料薄膜和马赫-曾德尔型滤波器的多波长被动锁模掺铒光纤激光器。该环形腔掺铒光纤激光器以 980 nm 的激光二极管作为抽运源, 3.2 m 掺铒光纤作为增益介质, 单壁碳纳米管作为可饱和吸收锁模器件。增加抽运功率到 24 mW 时, 得到中心波长为 1559.3 nm, 3 dB 谱宽为 1.4 nm, 平均输出功率为 0.8 mW 的脉冲激光输出。然后在环形腔中, 接入马赫-曾德尔型滤波器作为多波长选择器件, 通过调整马赫-曾德尔型滤波器两臂光纤长度差, 在室温下得到了 3 dB 带宽内稳定的 15 个波长激光脉冲输出, 波长间隔为 0.1 nm, 连续 0.5 h 观察, 脉冲激光输出稳定。

关键词 激光器; 多波长; 被动锁模; 单壁碳纳米管; 马赫-曾德尔型滤波器

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0102002

Multi-Wavelength Passively Mode-Locked Laser Based on Single-Walled Carbon Nanotube

Song Qiuyan¹ Chen Genxiang² Tan Xiaolin¹ Tian Kai¹

¹ Key Laboratory of All Optical Network and Modern Communications Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
² College of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China

Abstract Novel multi-wavelength passively mode-locked erbium-doped fiber laser based on single-walled carbon nanotube/polyimide film and Mach-Zehnder filter is proposed. A 3.2-m length of erbium-doped fiber acts as a gain medium. It is forward pumped by a 980-nm laser diode. The single-walled carbon nanotubes acts as mode locking devices. When pump power adds to 24 mW, the laser produces a stable pulse train with central wavelength of 1559.3 nm, 3 dB spectral width of 1.4 nm and average power of 0.8 mW. Then the Mach-Zehnder filter is introduced in the ring cavity as a comb filter. When the pump power is 25 mW, a stable 15-wavelength laser pulse is obtained by adjusting the polarization controller at the room temperature. The wavelength interval is 0.1 nm. The fiber laser can obtain stable multi-wavelength pulse train after continuous observation over 0.5 h.

Key words lasers; multi-wavelength; passively mode-locking; single-walled carbon nanotube; Mach-Zehnder filter

OCIS codes 140.3500; 140.4050; 310.6845

1 引 言

多波长脉冲光源是波分复用(WDM)和时分复用(OTDM)光网络中的基础光源, 对未来长距离大容量光通信的应用有着重要意义。被动锁模光纤激光器由于其结构简单紧凑、易实现全光纤集成等优

点成为产生脉冲光源的主要技术。锁模器件是被动锁模光纤激光器的主要组成部分, 可作为锁模器件的可饱和吸收体主要有半导体可饱和吸收镜(SESAM)、碳纳米管(CNTs)和石墨烯(GSA)。其中 SESAM 制作工艺复杂, 可调节性差, 恢复时间在

收稿日期: 2013-07-26; 收到修改稿日期: 2013-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(61275052)

作者简介: 宋秋艳(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事非线性光学材料方面的研究。E-mail: 10111004@bjtu.edu.cn

导师简介: 陈根祥(1965—), 男, 教授, 主要从事光通信、光纤器件、半导体光电子器件物理学等方面的研究。

E-mail: gxchen_bjtu@163.com

皮秒量级。碳纳米管(CNTs)制作工艺简单,恢复时间在几百飞秒左右,损伤阈值高,但其运行波长由直径决定。石墨烯恢复时间可达到100 fs,损伤阈值更高,但获得比较困难^[1]。多波长主要通过多波长滤波器来实现,常见的多波长滤波器有法布里-珀罗滤波器、马赫-曾德尔型(M-Z)滤波器、Lyot 双折射光纤滤波器、保偏光纤 Sagnac 环滤波器及各种特殊光纤光栅滤波器等^[2]。

2004年,Set等^[3]将1 μm厚的单壁碳纳米管薄膜夹于两片1 mm厚的石英基片中,制成透射式碳纳米管饱和吸收体,用在环形腔掺铒光纤激光器中,实现了脉宽为1.1 ps,3 dB谱宽3.7 nm的超短脉冲输出。2008年,Tausenev等^[4]将单壁碳纳米管与羧甲基纤维素混合制成的复合材料薄膜作为可饱和吸收体,固定在两根单模光纤的端点处,用于环形腔掺铒光纤激光器,实现了脉宽177 fs,谱宽14.43 nm的超短脉冲输出。2008年,张祖兴等^[5]利用Lyot双折射光纤周期性滤波器和非线性偏振旋转效应实现了18个波长的多波长输出。2012年,杨秀峰等^[6]在环形腔掺铒光纤激光器中,利用相移光栅,通过调整偏振控制器,得到了三波长的稳定输出。

本文提出了以单壁碳纳米管作为可饱和吸收体,M-Z滤波器作为多波长选模器件的多波长被动锁模光纤激光器。实现了波长间隔0.1 nm,3 dB带宽、15个波长的多波长脉冲激光输出。

2 实验装置

图1为基于单壁碳纳米管和马赫-曾德尔型滤波器的多波长被动锁模掺铒光纤激光器的实验装置图。该环形腔光纤激光器以980 nm激光二极管(LD)作为抽运源,抽运光通过980 nm/1550 nm波分复用器耦合进入环形腔;3.2 m掺铒光纤作为增

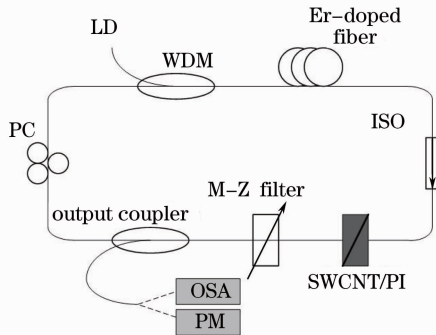


图1 多波长被动锁模掺铒光纤激光器结构
Fig.1 Schematic of multi-wavelength passively mode-locked erbium-doped fiber laser

益介质,其在1530 nm的吸收峰为28.81 dB/m,数值孔径为0.251;隔离器(ISO)用于保证光在环形腔内单向传输,阻隔光纤端面 and 薄膜表面的反射光;单壁碳纳米管/聚酰亚胺复合材料薄膜(SWCNT/PI)作为可饱和吸收锁模器件,用来实现脉冲光输出;腔内插入偏振控制器(PC)控制偏振态;M-Z滤波器作为滤波选频器件,用来产生多波长激光;10/90的耦合器中,10%的光强输出连接到光谱分析仪(OSA)和功率计(PM)上,用来记录数据并分析输出激光特性,90%回到环形腔形成反馈。

2.1 饱和吸收体的制作及特性分析

实验中所用的SWCNT/PI是由单壁碳纳米管与聚酰亚胺复合而成,将单壁碳纳米管粉末和聚酰亚胺通过超声处理分散在N,N-二甲基甲酰胺(N,N-dimethylformamide, DMF)中,采用刮涂法将复合溶液涂在石英基片上,热亚胺化制得30 μm厚的薄膜,取1.5 mm×1.5 mm的小片,置于两个PC光纤头中间,如图2所示。

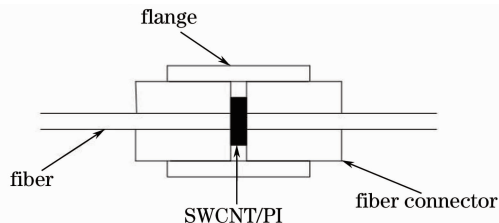


图2 SWCNT/PI薄膜插入PC连接器的结构图
Fig.2 Device structure of SWCNT/PI film inserting in a PC connector

SWCNT/PI可饱和吸收体的吸收率与腔内光强有关,可表示为^[7]

$$\alpha(I) = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_{\text{sat}}} + \alpha_{\text{ns}}, \quad (1)$$

式中I为腔内光强,I_{sat}为饱和光强,α₀为线性限制饱和吸收率,α_{ns}为非饱和吸收率。

图3为不同入射光强下SWCNT/PI的吸收率,由(1)式最小二乘法拟合图3中的数据可得I_{sat}=18.76 mW/cm²,α₀=0.0576,α_{ns}=0.6403。当腔内光强较小时,腔内大部分光被SWCNT/PI吸收,随着光强增大,SWCNT/PI吸收饱和,腔内大部分光通过。SWCNT/PI可饱和吸收体的这一特性,实现了对脉冲的压缩整形,从而得到脉冲输出^[8]。

2.2 M-Z滤波器的制作和特性分析

实验中的滤波器为M-Z滤波器,是由两个3 dB耦合器构成的,如图4所示。

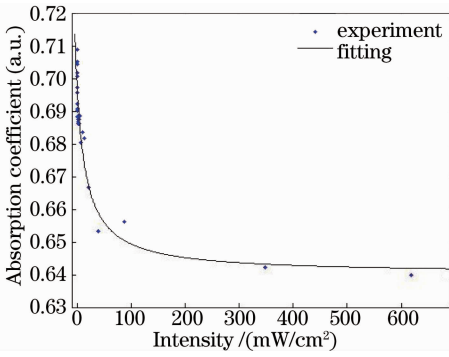


图 3 SWCNT/PI 饱和吸收体的吸收系数强度依赖特性曲线

Fig. 3 Intensity-dependent absorption coefficient of SWCNT/PI saturable absorber

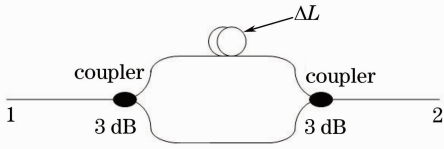


图 4 M-Z 滤波器结构

Fig. 4 Structure of the M-Z filter

滤波器两臂长度相差 ΔL ，使得相同的两束光通过两臂时产生相位差 $\Delta\varphi$ ，两束光相互干涉后从 2 端输出，由于不同波长的光所产生的相位差不同，故有的波长的光相干加强，有的波长的光相干减弱，故在 2 端得到梳状滤波。2 端的透射特性由传输矩阵得^[2]

$$T(\lambda) = \frac{1 - \cos\Delta\varphi}{2}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\varphi = 2\pi n\Delta L/\lambda$ ， λ 为入射光波长， n 为双臂光纤折射率。

梳状 M-Z 型滤波器所得梳状滤波由光谱分析仪测得如图 5 所示，从图中可以看出，波长间隔为 0.1 nm，插入损耗为 0.75 dB。

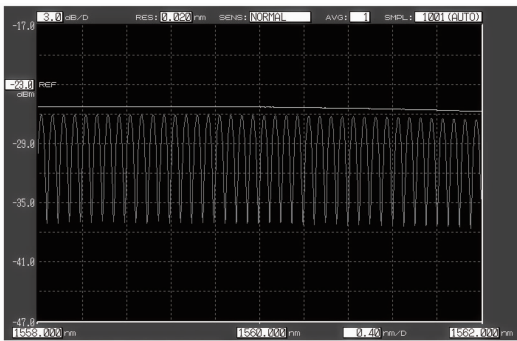


图 5 M-Z 滤波器透射曲线

Fig. 5 Transmission spectrum of M-Z filter

3 实验结果与分析

增加抽运功率到 10 mW 时，光纤激光器实现锁模，继续增加抽运功率到 24 mW，调整偏振控制器，得到稳定的锁模脉冲，通过分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪得脉冲的 3 dB 谱宽为 1.4 nm，中心波长为 1559.3 nm，激光器环形腔腔长为 12.3 m，则对应的重复频率为 16.27 MHz，如图 6 所示。光功率计测得 10% 输出端最大平均输出光功率为 0.8 mW。用光功率计连续测量 10% 输出端 0.5 h，得到平均输出光功率波动范围在微瓦量级，表明该被动锁模光纤激光器的稳定性良好。

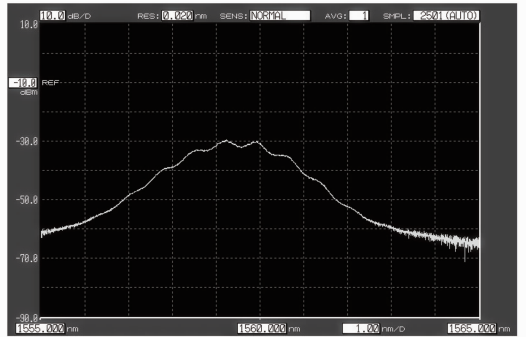


图 6 被动锁模激光器输出光谱图

Fig. 6 Output optical spectrum of passively mode-locked fiber laser

继续增加抽运功率，通过光功率计测得输出激光功率逐渐升高，当抽运功率增至 43 mW 时，输出激光功率增至最大，为 1.3 mW，与此同时，中心波长随抽运功率的增加向长波长偏移至 1562.8 nm，如图 7 所示。继续增大抽运功率，由光谱分析仪显示，锁模脉冲消失，因为超过 SWCNT/PI 薄膜损伤阈值，SWCNT/PI 薄膜不再起饱和吸收作用。

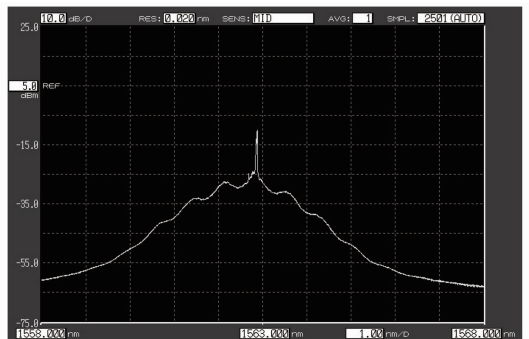


图 7 被动锁模激光器输出光谱图

Fig. 7 Output optical spectrum of passively mode-locked fiber laser

将 M-Z 型梳状滤波器接入环形腔内，调节抽运功率到 25 mW，调整偏振控制器，得到 15 个波长的

稳定光脉冲输出, 3 dB 谱宽范围从 1557.1 nm 到 1558.5 nm, 波长间隔 0.1 nm, 光功率计测得 10% 输出端平均输出光功率为 0.67 mW, 如图 8 所示。中心波长 1557.8 nm, 与图 6 相比有偏移, 因为 M-Z 型梳状滤波器的接入加大了环形腔的损耗。M-Z 型梳状滤波器长度约为 2.8 m, 环形腔腔长增大, 对应的重复频率变为 13.25 MHz。

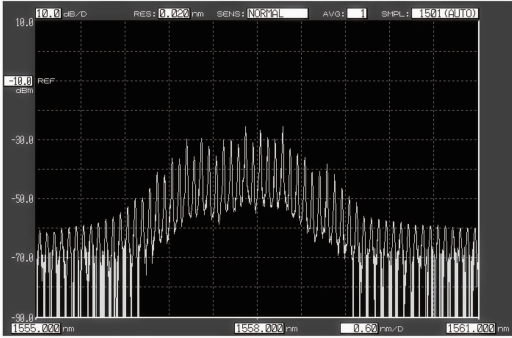


图 8 多波长被动锁模光纤激光器输出光谱图

Fig. 8 Output optical spectrum of multi-wavelength passively mode-locked fiber laser

以 10 min 为间隔, 在 0.5 h 内, 通过分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪观察 15 个波长光脉冲输出的稳定性, 如图 9 所示。

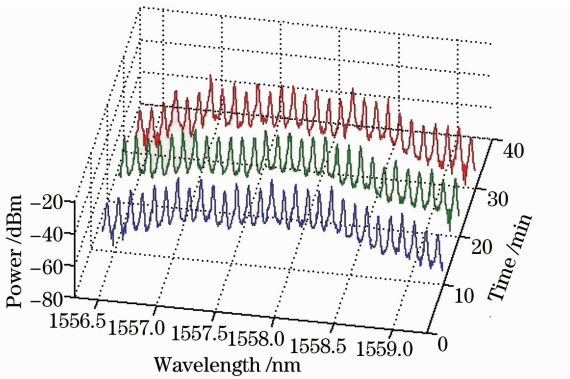


图 9 30 min 内的输出光谱变化

Fig. 9 Change of output spectrum during 30 min

4 结 论

提出了一种基于单壁碳纳米管和 M-Z 型滤波器的多波长被动锁模掺铒光纤激光器。单壁碳纳米

管与聚酰亚胺复合成薄膜, 再夹入光纤法兰盘, 制成了结构简单并与光纤兼容的透射式可饱和吸收体, 实现了 3 dB 光谱宽度为 1.4 nm 的脉冲光输出。接入 M-Z 型梳状滤波器后得到 15 个波长脉冲输出, 实现了多波长被动锁模光纤激光器结构。与以往的多波长光纤激光器和被动锁模光纤激光器相比, 此光纤激光器集以上两种激光器的输出特性于一体, 对未来波分复用和时分复用光网络及两者的结合有着一定的意义。

参 考 文 献

- 1 Tao Kuiyuan. Theoretical and Experimental Study on Passively Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Lasers[D]. Tianjin: Nankai University, 2011. 3-7.
陶魁园. 被动锁模掺铒光纤激光器的理论和实验研究[D]. 天津: 南开大学, 2011. 3-7.
- 2 Liu Shuang. Research on Multiwavelength Fiber Lasers and Their Applications [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010. 18-19.
刘爽. 多波长光纤激光器及其应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010. 18-19.
- 3 Sze Y Set, Hiroshi Yaguchi, Yuichi Tanaka, *et al.*. Ultrafast fiber pulsed lasers incorporating carbon nanotubes[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(1): 137-146.
- 4 A V Tausenev, E D Obraztsova, A S Lobach, *et al.*. 177 fs erbium-doped fiber laser mode locked with a cellulose polymer film containing single-wall carbon nanotubes[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(17): 171113.
- 5 Zhang Zuxing, Sang Minghuang, Ye Zhiqing, *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 648-652.
张祖兴, 桑明煌, 叶志清, 等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 648-652.
- 6 Yang Xiufeng, Fang Xiuli, Tong Zhengrong, *et al.*. Experimental study of multi-wavelength fiber laser based on phase-shifted fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602012.
杨秀峰, 方秀丽, 童峥嵘, 等. 基于相移光栅的多波长掺铒光纤激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602012.
- 7 Hasan Tawfique, Sun Zhipei, Wang Fengqiu, *et al.*. Nanotube-polymer composites for ultrafast photonics [J]. Advanced Materials, 2009, 21(38-39): 3874-3899.
- 8 Wang Jin, Zhang Hongming, Zhang Jun, *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 163-165.
王旌, 张洪明, 张 鑫, 等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 163-165.

栏目编辑: 宋梅梅