

# 基于单壁碳纳米管的波长可切换被动锁模光纤激光器

朱攀<sup>1</sup> 桑梅<sup>1</sup> 高杨<sup>2</sup> 王晓龙<sup>1</sup> 刘珂<sup>1</sup> 王俊龙<sup>1</sup> 杨天新<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

<sup>2</sup>镇江船艇学院指挥系, 江苏 镇江 212003

**摘要** 报道了一种基于单壁碳纳米管可饱和吸收体、工作波长可切换的被动锁模光纤激光器。利用可饱和吸收体薄膜厚度调节腔内损耗, 不仅实现了基频被动锁模脉冲序列的稳定输出, 还有效控制了掺铒光纤激光器的增益谱线。实验表明, 当腔内可饱和吸收体薄膜较薄或者较厚时, 激光器可以分别产生中心波长为 1545 nm 和 1562 nm 的脉冲; 当腔内可饱和吸收体薄膜厚度介于较薄和较厚之间的适当值时, 仔细调整偏振控制器, 可以实现激光器在这两个中心波长之间相互切换的稳定锁模运转, 在切换的过程中还可观察到这两个中心波长同时出现的锁模现象。

**关键词** 激光器; 被动锁模; 波长切换; 单壁碳纳米管; 薄膜; 可饱和吸收体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0202005

## Wavelength Switchable Passive Mode-Locking Fiber Laser Based on Single-Wall Carbon Nanotube

Zhu Pan<sup>1</sup> Sang Mei<sup>1</sup> Gao Yang<sup>2</sup> Wang Xiaolong<sup>1</sup> Liu Ke<sup>1</sup>

Wang Junlong<sup>1</sup> Yang Tianxin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup>Department of Watercraft Commanding, ZhenJiang Watercraft College, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

**Abstract** A passively mode-locked fiber laser, whose operating wavelength can be switched based on the single-wall carbon nanotube saturable absorber (SWCNT-SA), is demonstrated. By adjusting the thickness of saturable absorber film to change the intracavity loss, not only stable mode-locked output is obtained, but also the gain profile of the erbium-doped fiber laser is effectively controlled. The experimental results show that the lasers can generate mode-locked pulses with the central wavelength of 1545 nm and 1562 nm, in the thinner and thicker SWCNT-SA, respectively. Additionally if the thickness of SWCNT-SA is appropriately controlled between the thinner and thicker ones, the laser can generate pulses both with central wavelength of 1545 nm and 1562 nm, and the operating wavelength can be switched from one to the other by carefully adjusting the polarization controller. In the process of wavelength switching, the phenomenon of mode-locking is also observed when the two central operating wavelengths simultaneously appear.

**Key words** lasers; passively mode-locking; wavelength switch; single-wall carbon nanotubes; film; saturable absorber

**OCIS codes** 140.3510; 140.3560; 140.3600; 140.4050; 160.4236

收稿日期: 2012-09-03; 收到修改稿日期: 2012-09-28

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327806)、国家自然科学基金面上项目(61072011)、天津市自然科学基金重点项目(12JCZDJC20700)和天津市自然科学基金项目(10JCYBJC01200)资助课题。

作者简介: 朱攀(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事单壁碳纳米管被动锁模激光器方面的研究。

E-mail: zhuyangpp@163.com

导师简介: 桑梅(1967—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光技术与非线性光学领域方面的研究。

E-mail: m\_sang@tju.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

单壁碳纳米管(SWCNT)已经被证实具有超快非线性光学响应和非线性光学可饱和吸收效应<sup>[1]</sup>。SWCNT是一种直接带隙材料,带隙大小由纳米管直径和手性决定<sup>[2]</sup>,通过改变SWCNT的管直径,可以调节它的可饱和吸收波长。将SWCNT制成可饱和吸收体(SA),并用于超快被动锁模的激光器已在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的范围内实现了锁模运转<sup>[3\sim 10]</sup>。由于碳纳米管有一个相当宽的可饱和吸收带宽,使得同样的SWCNT可饱和吸收体(SWCNT-SA)用于不同结构的激光器中,能在一个大的波长范围内进行不同波长的锁模<sup>[11\sim 13]</sup>。

除了在一个中心波长处产生锁模脉冲外,多波长超快激光器还能在不同的中心波长处产生脉冲序列,这已广泛应用在光传感、光信号处理和光通信中。相比于一些利用主动锁模的多波长脉冲激光器,被动锁模激光器能产生更短的脉冲。利用非线性偏振旋转技术,人们已在光纤环形腔中观察到多波长的锁模脉冲输出<sup>[14\sim 17]</sup>,基于半导体可饱和吸收镜的锁模激光器也成功实现了多波长耗散孤子运转<sup>[18,19]</sup>,近几年,人们也实现了基于SWCNT-SA和石墨烯可饱和吸收体的多波长可调谐锁模脉冲输出<sup>[20\sim 24]</sup>。在这些被动锁模激光器结构中,输出脉冲通过腔内的光学滤波器<sup>[15,18,20\sim 22]</sup>进行脉冲输出波长选择,或者利用腔内双折射效应达到滤波的效果<sup>[23]</sup>。但多数情况下,这些激光器输出的可调谐波长相邻间隔只有几纳米,且对光损伤阈值敏感<sup>[14,15,18]</sup>,受环境影响较大,制备比较昂贵。

本文将SWCNT和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)分散在二氯化苯(DCB)中,利用光学诱导的方法<sup>[25]</sup>,在单模光纤端面镀上一层SWCNT-SA薄膜,通过控制镀膜时间,在光纤端面获得不同厚度的SA<sup>[25]</sup>。不同于使用光学滤波技术,这里通过控制SWCNT-SA的厚度,改变激光器的腔内损耗和掺铒光纤的增益谱线,将不同镀膜厚度的光纤分别用于激光器环形腔中进行实验,分别实现激光器在1562 nm和1546 nm这两个中心波长附近的锁模运转,激光器的锁模频率为8.367 MHz,最后选择一定镀膜时间的光纤进行实验,在同一激光器中实现锁模中心波长在1562 nm和1546 nm之间的自由切换,切换的中心波长之差为16.24 nm。

# 2 实验装置

图1为环形激光腔光纤激光器的被动锁模实验装置。其中掺铒光纤放大器(EDFA)自带抽运源,其内部抽运源通过980 nm/1550 nm波分复用器耦合进入环形腔,为环形腔提供能量;EDFA输出1550 nm的激光波长;隔离器用于隔离镀膜单模光纤(SMF)端面反射的光波,使光波在环形腔中单向传输,以使EDFA免受反射光的冲击;偏振控制器(PC)用于调节腔内的双折射率;SMF端面的碳纳米管薄膜用作可饱和吸收体;耦合器的耦合比为90:10,90%的光在环形腔中循环,10%的光输出用于示波器和光谱仪记录数据,环形腔的总腔长 $L$ 为23.9 m。

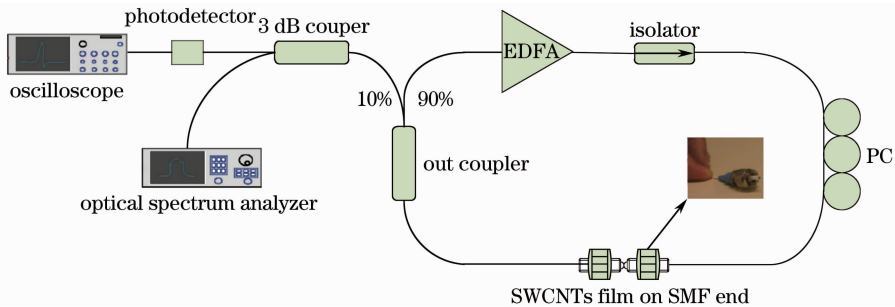


图1 被动锁模光纤激光器的实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of passive mode-locked fiber laser

与利用光学滤波器控制激光波长、并实现被动锁模光纤激光器在单波长和双波长运转并相互切换不同,本文利用掺铒光纤的增益谱线在一定的抽运功率和输入信号下有不同增益谱线<sup>[26]</sup>,通过改变薄膜厚度来改变腔内损耗。在一定的抽运功率下,掺铒光纤的增益斜率随腔内损耗的改变而变化,当

腔内损耗较小时,掺铒光纤的增益在1560 nm附近最大;但当腔内损耗增加时,掺铒光纤的增益峰向1530 nm移动;当腔内损耗增加到一定值时,掺铒光纤出现两个相近的增益峰分别在1560 nm和1530 nm附近,此时激光器可以实现双波长运转。通过改变碳纳米管薄膜厚度来调节腔内损耗,进而

改变腔内掺铒光纤的增益谱线,最后实现可进行波长切换的被动锁模激光器。

实验中 SWCNT-SA 薄膜的制备与文献[27]一致,并已验证了制备该薄膜的分散液具有良好的非线性光学特性<sup>[28]</sup>。镀膜过程中,通过控制 EDFA 的输出功率和镀膜时间来控制薄膜的厚度,进而改变 SMF 的损耗。

用光谱仪(AQ-631SA)测量激光器的输出光谱,带有 500 MHz 光电转换器的数字示波器(TDS 3052C)测量输出的脉冲串,电谱图由电谱分析仪获得。

### 3 实验结果和分析

利用文献[27]的镀膜方法,通过多组实验发现,随着镀膜时间的增加,SMF 的损耗逐渐增大,且镀膜时间越长,损耗增加的幅度越小,如图 2 所示。

在随后的锁模实验中发现,碳纳米管薄膜较薄或者较厚(镀膜时间越长,得到的薄膜越厚<sup>[25]</sup>)时,激光器将分别在两个不同波长处实现单波长锁模运转。

将镀膜光纤与大功率的光纤激光器相连,增加激光器的输出功率,得到 SWCNT-SA 薄膜上功率密度与透射率的关系图(如图 3 所示)。由图可见,SA 的调制深度  $\delta$  可达 12.9%。

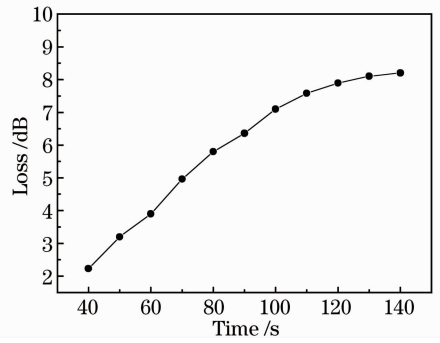


图 2 镀膜时间与单模光纤损耗的关系图  
Fig. 2 Relationship between coating time and SMF loss

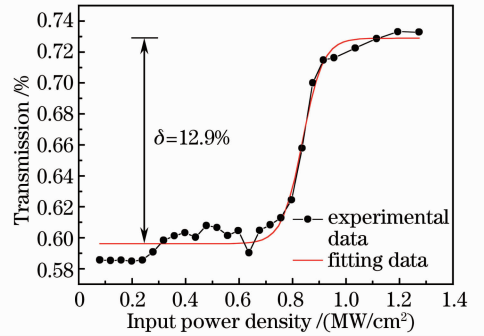


图 3 功率密度与透射率的关系图  
Fig. 3 Relationship between transmission and power density

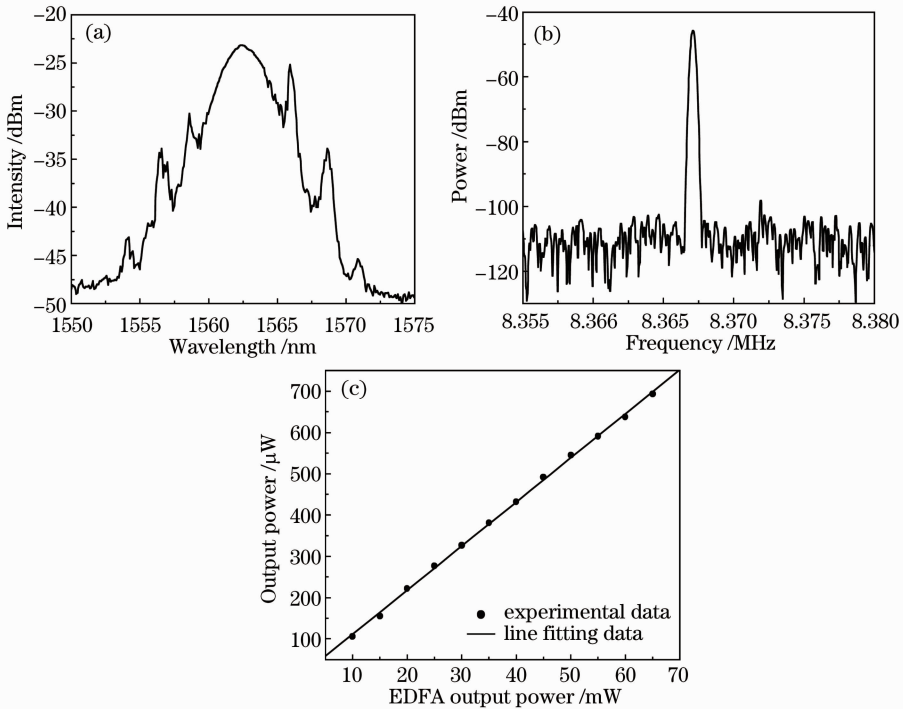


图 4 锁模运转时的相关图形。(a)输出光谱;(b)电谱图;(c)激光器与 EDFA 输出功率的关系  
Fig. 4 Related graphs of mode-locked operation. (a) Output spectrum; (b) electrical spectrum; (c) relationship between output powers of laser and EDFA

### 3.1 单波长锁模

当环形腔中没有加入镀有 SWCNT 薄膜的光纤时,测得腔内总损耗在 1550 nm 处为 3.6 dB。将镀膜时间为 50 s 的 SMF(镀膜前后损耗为 3.2 dB)置于图 1 的环形腔中,此时腔内的总损耗为 6.8 dB,掺铒光纤在 1560 nm 附近有一个增益峰。打开 EDFA,当输出功率增到 9 mW 时,环形腔开始产生锁模脉冲输出。锁模状态下,关闭 EDFA 后重新打开,激光器可自动恢复到相同的锁模状态,说明锁模激光器具有很好的开机自启动能力。将 EDFA 输出功率增至 30 mW 时,记录的光谱图和电谱图如图 4(a)、(b)所示,光谱的中心波长为 1562.4 nm,3 dB 带宽为 3.2 nm,脉冲信噪比为 62.3 dB。图 4(c)为激光器输出功率随 EDFA 输出功率变化的曲线。从图中可看出,随着 EDFA 输出功率的增加,激光器的输出功率近似呈线性增大。图 5 为对应锁模脉冲序列,脉冲重复频率为 8.367 MHz,与腔内光子运行一圈的周期一致,此时的单脉冲能量为 39.2 pJ。由于锁模激光器输出功率比较低,不能测量其自相关曲线。类似于多孤子光纤激光器<sup>[29]</sup>,在锁模状态下,增加 EDFA 的输出功率时,可以观察到有多孤子产生。

随后在另一 SMF 端面镀 SWCNT 薄膜,并增

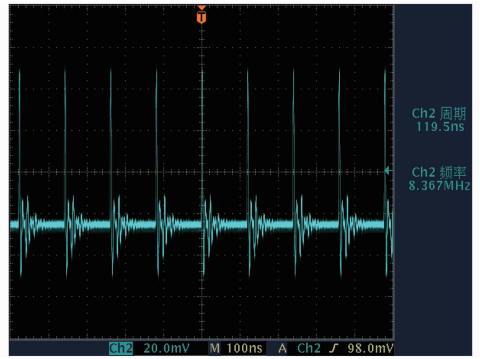


图 5 输出锁模脉冲序列(8.367 MHz)

Fig. 5 Output mode-locked pulse sequence (8.367 MHz)

加镀膜时间至 100 s,在光纤端面形成一层较厚 SA 薄膜,并测得镀膜光纤的损耗为 7.1 dB,此时腔内总损耗为 10.7 dB。将此 SMF 连接于激光器环形腔中,如图 6 所示,当激光腔内损耗改变后,激光器的输出发生了改变。当 EDFA 输出功率增加到 13 mW 时,激光器开始产生稳定锁模脉冲。将 EDFA 的输出功率设置为 30 mW,记录对应的激光器输出光谱图和电谱图,如图 6(a)和(b)所示。从图 6(a)和(b)可知,激光脉冲的中心波长为 1545.36 nm,信噪比为 60.2 dB。由于腔内损耗增大,激光器的输出平均功率比中心波长为 1562.4 nm 的平均功率小。图 6(c)为激光器输出功

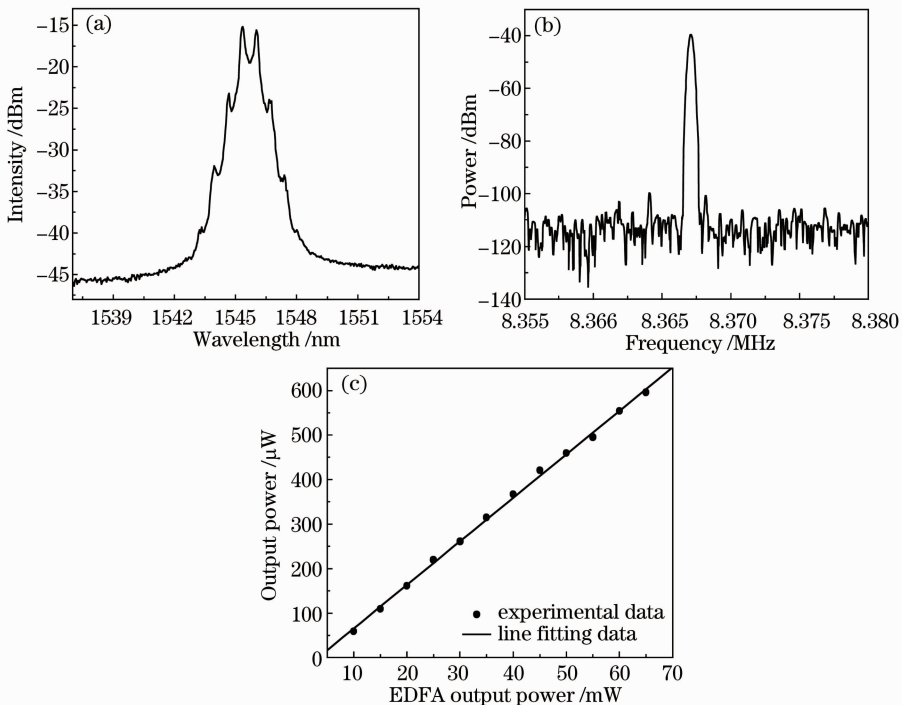


图 6 锁模运转时的相关图形。(a)输出光谱;(b)电谱图;(c)激光器与 EDFA 输出功率的关系  
Fig. 6 Related graphs of mode-locked operation. (a) Output spectrum; (b) electrical spectrum;  
(c) relationship between output power of laser and EDFA

率与 EDFA 输出功率的关系图。从图中可知,激光器的输出功率近似呈线性增长,对应的锁模脉冲序列如图 7 所示,锁模脉冲的重复频率为 8.369 MHz,此时的单脉冲能量为 31.8 pJ。

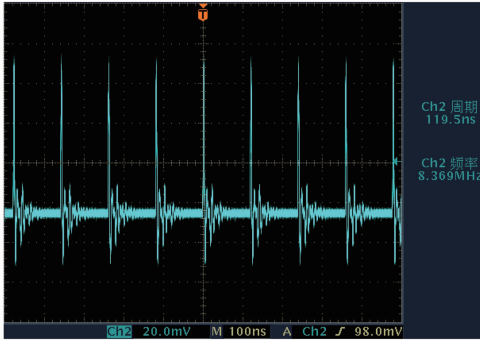


图 7 输出锁模脉冲序列(8.369 MHz)

Fig. 7 Output mode-locked pulse sequence (8.369 MHz)

当 SMF 端面的 SWCNT-SA 薄膜较厚或者较薄时,无论怎样调整 PC 和 EDFA 的功率输出,对应的光谱中心波长和脉冲序列重复频率均不会发生变化,但是锁模激光器的输出功率随 EDFA 的输出功率呈近似的线性增长。

### 3.2 双波长锁模

基于 3.1 节的实验结果,通过改变 SWCNT-SA 薄膜厚度调节腔内损耗,可以在不同中心波长处获得锁模脉冲,但前两个实验中的锁模中心波长固定

不变。根据文献[20]所述,当在一定的范围调节腔内损耗时,可以得到掺铒光纤在两个不同波长处获得几乎均等的增益峰,此时可以出现谐波。由于光纤激光器是一个弱双折射腔,腔内双折射形成一个人工的双折射滤波器,并有较大的带宽,这种双折射滤波器的滤波效应通常被忽略。但在此,这种效应和 SA 薄膜引起的损耗一起影响掺铒光纤的有效激光增益和增益谱线,当仔细调节腔内的 PC 时,可以实现不同中心波长处的锁模,并进行中心波长切换。选取等长度的单模光纤镀膜,镀膜时间为 70 s,测得镀膜光纤的损耗为 4.9 dB,将单模光纤接入环形腔,腔内的总损耗为 8.5 dB。当 EDFA 输出功率为 12 mW 时,出现锁模脉冲,不改变腔内的其他参数,仅仅增加 EDFA 的输出功率时,锁模脉冲的中心波长没有变化。图 8(a)、(b)是 EDFA 输出功率为 30 mW 时的光谱图和电谱图,此时的脉冲中心波长为 1562.18 nm,脉冲信噪比为 58.4 dB,激光器功率与 EDFA 输出功率的关系如图 8(c)所示,从图中可知两者近似线性增长。由图 9 可知,锁模脉冲的重复频率为 8.365 MHz。

在锁模状态下,将 EDFA 功率降至 18 mW,微调 PC,在光谱仪上可以看到,在 1546 nm 附近逐渐形成一个以此为波峰的波峰,而中心波长 1562 nm 附近的波峰逐渐下降。当两波峰高度大致相等时,

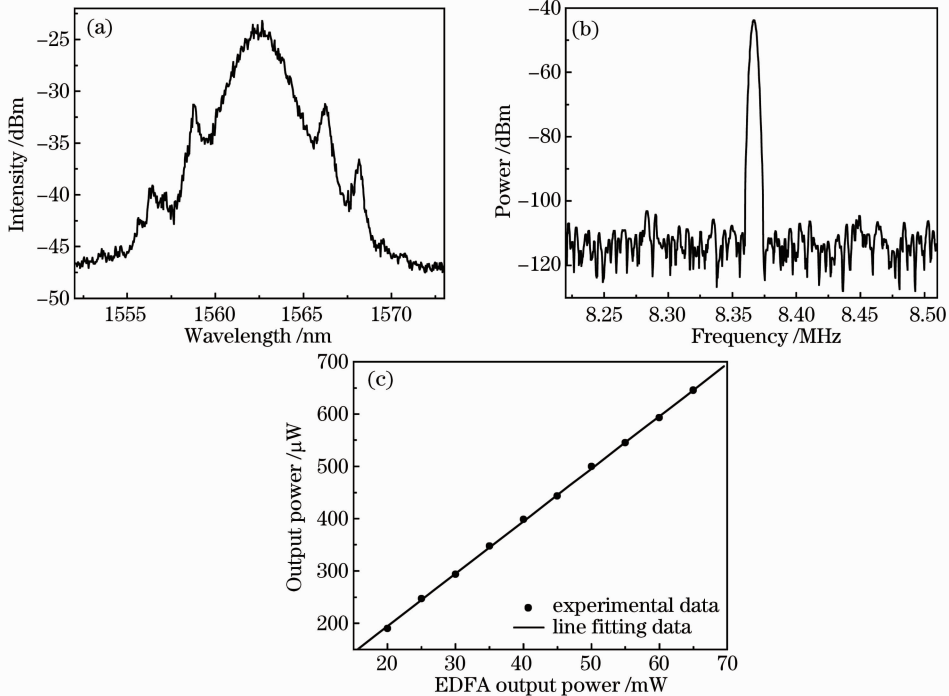


图 8 锁模运转时的相关图形。(a)输出光谱;(b)电谱图;(c)激光器与 EDFA 输出功率的关系  
Fig. 8 Related graphs of mode-locked operation. (a) Output spectrum; (b) electrical spectrum;  
(c) relationship between output power of laser and EDFA

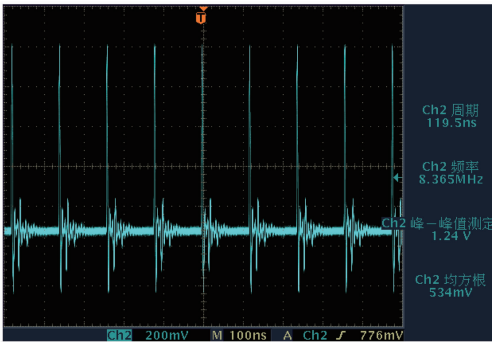


图 9 输出锁模脉冲序列(8.365 MHz)

Fig. 9 Output mode-locked pulse sequence (8.365 MHz)

保持 PC 的状态不变,增加 EDFA 输出功率至 30 mW,可得到如图 10 所示的光谱图,光谱同时分别以 1561.53 nm 和 1545.15 nm 为中心形成两个波峰。如图 11 所示,当 EDFA 输出功率在 30 mW 时,示波器上记录的图形显示出两种不同幅度的脉冲序列,频率为 17.3 MHz。但这种状态不稳定,光谱仪扫出的图形略有抖动,而示波器上的图形变化很大,电谱仪上的图形抖动剧烈,且信噪比很小,这可能是由于该状态正处于锁模中心波长由 1560 nm 向 1545 nm 转变的中间态所致。

再将 EDFA 的输出功率调至 18 mW,继续沿同一方向微调 PC,可以看到 1562 nm 附近的波峰逐渐消失,但 1546 nm 处仍有一个明显的波峰;当 PC 调至一定程度时,激光器又出现稳定的锁模脉冲。将 EDFA 的功率调整至 30 mW,该锁模状态下的光

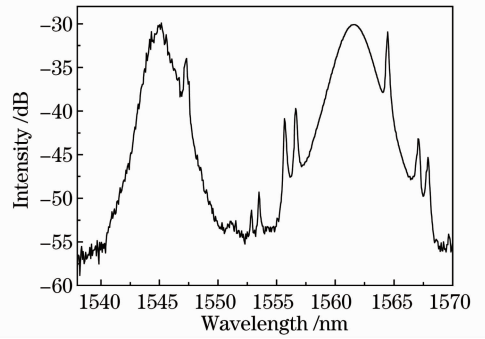


图 10 输出双波峰光谱

Fig. 10 Output dual wave peak spectrum

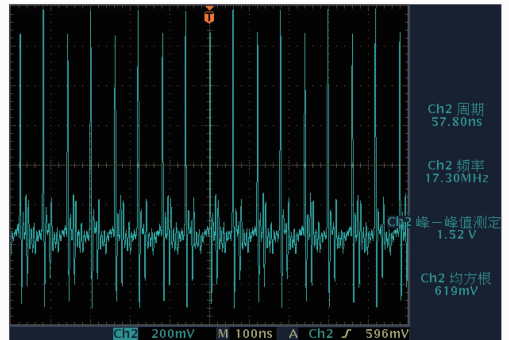


图 11 二次谐波锁模脉冲序列(17.3 MHz)

Fig. 11 Mode-locking pulse sequence of second harmonic (17.3 MHz)

谱图和电谱图如图 12(a)和(b)所示,光谱中心波长为 1545.92 nm,3 dB 带宽为 2.91 nm,电谱的信噪比为 57.1 dB,同时记录的锁模脉冲序列如图 13 所示,脉冲重复频率为 8.365 MHz。

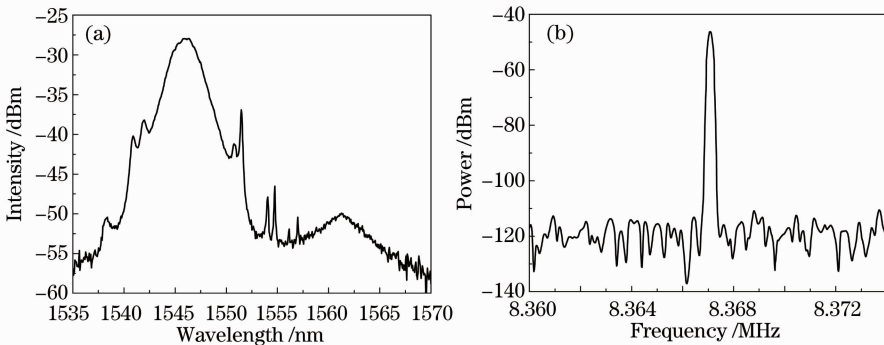


图 12 锁模运转时的相关图形。(a)输出光谱;(b)电谱图

Fig. 12 Related graphs of mode-locked operation. (a) Output spectrum; (b) electrical spectrum

在 EDFA 输出功率为 18 mW 时,若沿反方向微调 PC,可以将锁模激光器的中心波长调整至 1562 nm 附近,上述过程可以重复进行。

## 4 结 论

基于 SWCNT-SA,利用激光器腔内损耗与掺铒光纤增益谱线的关系,分别实现了被动锁模激光

器在不同中心波长处的锁模运转。结合光纤激光器腔内的双折射滤波效应,并制备适当的 SA 薄膜,实现了可切换锁模中心波长的被动锁模激光器,中心波长间隔达 16.24 nm,大于之前报道的 2~6 nm;当激光器工作在两个中心波长处时,在波长切换过程中可以观察到不稳定锁模状态。

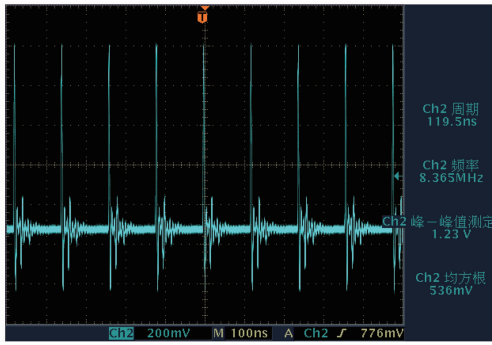


图 13 输出锁模脉冲序列(8.365 MHz)

Fig. 13 Output mode-locked pulse sequence  
(8.365 MHz)

## 参 考 文 献

- 1 Y. C. Chen, N. R. Karavikar, L. S. Schadler *et al.*. Ultrafast optical switching properties of single-wall carbon nanotube polymer composites at 1.55  $\mu\text{m}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(6): 975~977
- 2 H. Kataura, Y. Kumazawa, Y. Maniwa *et al.*. Optical properties of single wall carbon nanotubes [J]. *Synth. Met.*, 1999, **103**(3): 2555~2558
- 3 C. E. S. Castellani, E. J. R. Kelleher, J. C. Travers. Ultrafast Raman laser mode-locked by nanotubes[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(20): 3996~3998
- 4 S. J. Chang, H. I. Ju, H. Y. Sang *et al.*. Low noise GHz passive harmonic mode-locking of soliton fiber laser using evanescent wave interaction with carbon nanotubes [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(20): 19775~19780
- 5 J. Liu, Y. G. Wang, Z. S. Qu *et al.*. 2  $\mu\text{m}$  passive Q-switched mode-locked  $\text{Tm}^{3+}$ : YAP laser with single-walled carbon nanotube absorber[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2012, **44**(4): 960~962
- 6 C. C. Liu, Y. G. Wang, J. Liu *et al.*. Ultrafast laser performance of  $\text{Yb}^{3+}$ :  $\text{Se}_2\text{SiO}_5$  crystal with a single-walled carbon nanotube absorber[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(6): 1352~1355
- 7 H. F. Li, S. M. Zhang, J. Du *et al.*. Passively harmonic mode-locked fiber laser with controllable repetition rate based on a carbon nanotube saturable absorber[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(6): 1347~1351
- 8 M. Zhang, E. J. R. Kelleher, A. S. Pozharov *et al.*. Passive synchronization of all-fiber lasers through a common saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(20): 3984~3986
- 9 A. Martinez, K. M. Zhou, I. Bennion *et al.*. Passive mode-locked lasing by injecting a carbon nanotube-solution in the core of an optical fiber[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(11): 11008~11014
- 10 Qu Zunshi, Ma Baomin, Liu Jie. Research on pulse laser characteristics for 2  $\mu\text{m}$   $\text{Tm}^{3+}$ : YAP laser based on carbon nanotube absorber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102009
- 11 曲遵世, 马宝民, 刘杰. 基于碳纳米管的  $\text{Tm}^{3+}$ : YAP 2  $\mu\text{m}$  脉冲激光特性试验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102009
- 12 S. Yamashita, Y. Inoue, H. Yaguchi *et al.*. S-, C-, L-band picosecond fiber pulse sources using a broadband carbon-nanotube-based mode-locker [C]. In 2004 30th European Conference on Optical Communication, 2004. Th1. 3. 4
- 13 S. Kivistö, T. Hakulinen, A. Kaskela *et al.*. Carbon nanotube films for ultrafast broadband technology [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2358~2363
- 14 W. B. Cho, J. H. Yim, S. Y. Choi *et al.*. Ultra-broadband (>500 nm) single-walled carbon nanotube saturable absorber mode-locking of bulk solid-state lasers[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2010. AWE4
- 15 V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson *et al.*. Selfstarting passively mode-locked fiber ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1391~1393
- 16 Z. C. Luo, A. P. Luo, W. C. Xu *et al.*. Tunable multiwavelength passively mode-locked fiber ring laser using intracavity birefringence-induced comb filter [J]. *IEEE Photon. J.*, 2010, **2**(4): 571~577
- 17 Zhang Panzheng, Fan Wei, Wang Xiaochao *et al.*. Mode-locking and multiwavelength operation from all-fiber ytterbium doped laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302001
- 18 张攀政, 范薇, 汪小超等. 全光纤掺镱激光器实现锁模和多波长输出 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302001
- 19 Tian Zhen, Liu Shanliang, Zhang Bingyuan *et al.*. Graphene mode-locking  $\text{Er}^{3+}$  doped fiber pulse laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302004
- 20 田振, 刘山亮, 张丙元等. 石墨烯锁模掺铒光纤脉冲激光器的实验研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302004
- 21 H. Zhang, D. Y. Tang, X. Wu *et al.*. Multi-wavelength dissipative soliton operation of an erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12692~12697
- 22 Wang Guanghui, Wang Zhiteng, Chen Yu *et al.*. Passively graphene mode-locked soliton erbium-doped fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602003
- 23 汪光辉, 王志鹏, 陈宇等. 基于石墨烯的被动锁模掺铒光纤孤子激光器 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602003
- 24 R. Going, D. Popa, F. Torrisi *et al.*. 500 fs wideband tunable fiber laser mode-locked by nanotubes [J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2012, **44**(6): 1078~1081
- 25 Z. P. Sun, P. Daniel, H. Tawfique *et al.*. A stable, wideband tunable, near transform-limited, graphene-mode-locked [J]. *Nano. Res.*, 2010, **3**(9): 653~660
- 26 W. B. Che, J. W. Kim, H. W. Lee *et al.*. High-quality, large-area monolayer graphene for efficient bulk laser mode-locking near 1:25  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(20): 4089~4091
- 27 H. Zhang, D. Y. Tang, L. M. Zhao *et al.*. Compact graphene mode-locked wavelength-tunable erbium-doped fiber lasers: from all anomalous dispersion to all normal dispersion [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(8): 591~596
- 28 H. Zhang, D. Y. Tang, R. J. Knize *et al.*. Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, **96**(11): 111112
- 29 K. Kashiwagi, S. J. Yamashita, S. Y. Set. In-situ monitoring of optical deposition of carbon nanotubes onto fiber end [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5711~5715
- 30 P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology [M]. Verlag: Academic Press, 1999
- 31 Zhu Pan, Sang Mei, Wang Xiaolong *et al.*. Passive mode-locking pulse fiber laser research based on single-walled carbon nanotube saturable absorber [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(9): 1686~1690
- 32 朱攀, 桑梅, 王晓龙等. 基于单壁碳纳米管可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2012, **23**(9): 1686~1690
- 33 Zhu Pan, Sang Mei, Wang Xiaolong *et al.*. The research on nonlinear characteristics of SWCNT film by Z-Scan method measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(9): 091202
- 34 朱攀, 桑梅, 王晓龙等. Z 扫描法测单壁碳纳米管薄膜非线性特性的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(9): 091202
- 35 K. Jiang, S. G. Fu, P. Shum. Experimental observations of multiple solitons generation in a carbon-nanotube based passively mode-locked fiber laser [C]. *International Conference on Communication and Mobile Computing*, 2010, **2**: 43~46