

# L 波段可切换双波长被动锁模光纤激光器

刘奂奂, 蒋巧, 宋伟, 喻叶, 李子龙, 庞拂飞\*

上海大学通信与信息工程学院, 特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室,  
上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444

**摘要** 报道了基于碳纳米管饱和吸收体(CNT-SA)的 L 波段可切换双波长被动锁模光纤激光器。通过调节抽运功率, 该激光器光谱的中心波长可以在 1572.9 nm 和 1596.6 nm 之间切换, 对应的 3 dB 光谱宽度分别为 3.68 nm 和 2.34 nm, 脉冲宽度均为 1.80 ps。此外, 双波长锁模光谱的中心波长为 1572.3 nm 和 1597.1 nm, 两个波长的间隔为 24.8 nm。同时, 对 L 波段可切换双波长锁模光纤激光器的形成和演化进行了数值研究。数值模拟结果与实验观察结果吻合, 表明可切换双波长锁模的成因是增益光纤透射光谱的变化。

**关键词** 激光器; 锁模光纤激光器; 波长可切换; 双波长; L 波段

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0701007

## L-Band Switchable Dual-Wavelength Passively Mode-Locked Fiber Laser

Liu Huanhuan, Jiang Qiao, Song Wei, Yu Ye, Li Zilong, Pang Fufei\*

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research

Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai Institute for Advanced

Communication and Data Science, School of Communication & Information Engineering,

Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** An L-band switchable dual-wavelength passively mode-locked fiber laser based on a carbon-nanotube saturable absorber is reported herein. The central wavelength of the fiber laser spectrum can switch between 1572.9 nm and 1596.6 nm with a pulse width of 1.80 ps by tuning the pump power; the corresponding 3-dB spectral widths of the two wavelengths are 3.68 nm and 2.34 nm, respectively. Additionally, the dual-wavelength mode-locked fiber laser has a wavelength separation of  $\sim 24.8$  nm, with two central wavelengths of 1572.3 nm and 1597.1 nm, respectively. A numerical study is conducted on the formation and evolution of the L-band switchable dual-wavelength mode-locked fiber laser. The numerical results are in good agreement with the experimental observations, indicating that the switchable dual-wavelength mode-lock can be attributed to the change in the transmission spectrum of the gain fiber.

**Key words** lasers; mode-locked fiber laser; wavelength switchable; dual-wavelength; L-band

**OCIS codes** 140.3510; 140.4050; 140.3600

## 1 引 言

被动锁模光纤激光器具有输出脉冲窄、光束质量高、无需对准、散热性能好等优点, 在众多领域具有很好的应用前景<sup>[1-2]</sup>。如今, 各种波长的锁模光纤激光器已经引起了研究人员的关注, 如  $1 \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>,  $1.5 \mu\text{m}$ <sup>[4]</sup>,  $1.6 \mu\text{m}$ <sup>[5]</sup> 和  $2 \mu\text{m}$ <sup>[6-8]</sup>。L 波段(1565 ~ 1625 nm)锁模光纤激光器可以将光通信系统中主

要在 C 波段(1530 ~ 1565 nm)应用的波分复用(WDM)技术延伸到 L 波段, 进一步提高通信容量, 现已逐渐成为研究热点。

多波长锁模光纤激光器可以同时产生不同中心波长的超短脉冲, 相比于使用多个不同发射波长的激光器, 其成本更低, 且使用更加方便。为了实现多波长锁模, 多数激光器均采用特殊的光学器件, 如光学滤波器<sup>[9-11]</sup>、保偏光纤<sup>[12-13]</sup> 和非线性光学环形

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-03-25; 录用日期: 2019-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61605108, 61635006)、上海高校青年东方学者人才计划(QD2016025)

\* E-mail: ffpang@shu.edu.cn

镜<sup>[14-15]</sup>等。然而,这些辅助器件将增加激光器系统的复杂性,并且可能会导致激光器受振动和环境热变化的影响。为了降低这种复杂性,可以采用直接调谐激光腔的固有腔损耗或净增益<sup>[16-18]</sup>的方法来实现多波长锁模。2014年,Rosa等<sup>[19]</sup>通过改变抽运功率来改变增益光纤的总体粒子数反转率,进而改变每个波长的净增益,最终实现输出光谱的中心波长从1556 nm到1533 nm的切换。与采用特殊光学器件来实现多波长锁模的光纤激光器相比,该方法更简单,并且能产生更稳定的皮秒锁模脉冲,而且发射波长峰值的间隔更大。除了1.55  $\mu\text{m}$ <sup>[20-22]</sup>的C波段之外,1  $\mu\text{m}$ 波段<sup>[23-24]</sup>和2  $\mu\text{m}$ 波段<sup>[25-28]</sup>的多波长光纤激光器也受到研究人员的关注。Zhao等<sup>[18]</sup>实现了在大约1572 nm和1588 nm处的双波长锁模,输出脉冲持续时间约为12.2 ns,然而,对L波段皮秒脉冲的可切换多波长锁模光纤激光器的研究还鲜有报道。

本文报道了一种基于碳纳米管饱和吸收体(CNT-SA)的L波段可切换的单波长锁模和同时双波长锁模的全光纤被动锁模激光器。通过调节抽运功率,光纤激光器可在1572.9 nm和1596.6 nm实现可切换模式锁定,每个脉冲持续时间约为1.80 ps。此外,光纤激光器可以实现同时双波长锁模,波长间隔约为24.8 nm。同时,基于非线性薛定谔方程,通过数值模拟进一步研究了L波段可切换双波长锁模光纤激光器的形成和演化。数值结果与实验观察结果一致,表明可切换双波长锁模的成因是增益光纤增益谱的变化。

## 2 实验装置

图1为基于CNT-SA的L波段可切换双波长被动锁模光纤激光器的实验装置示意图。采用最大输出功率为700 mW、波长为976 nm的半导体激光器作为抽运源。抽运光经过980/1550 nm波分复用器(WDM)进入掺铒光纤(EDF; Er30-4/125, LIEKKI, 芬兰)中,其中掺铒光纤的群速度色散参数 $\beta^{(2)}$ 为+14.5 ps<sup>2</sup>/km,WDM的尾纤为0.95 m长的HI1060光纤,群速度色散参数 $\beta^{(2)}$ 为-7 ps<sup>2</sup>/km。掺铒光纤后连接偏振无关隔离器,用于确保光的单向传输。用耦合比为80:20的耦合器将谐振腔中20%的激光输出到腔外。调制深度约为5%的CNT-SA接在耦合器后面作为锁模器件。为了优化锁模条件,在CNT-SA后面连接了一个偏振控制器(PC)。除WDM的尾纤外,所有器件尾纤

都为单模光纤(SMF),其总长度约为16.10 m。实验中,光谱和脉冲序列分别使用分辨率为0.02 nm的光谱分析仪(AQ6370C, Yokogawa, 日本)和带宽为1 GHz的示波器(MSO4104, Tektronix, 美国)配合带宽为5 GHz的光电探测器进行记录。此外,激光频谱用信号频谱分析仪(FSV30, Rohde & Schwarz, 慕尼黑, 德国)进行测量。最后,用自相关仪(FR-103HS, Femtochrome, 美国)对锁模激光脉冲宽度进行测量。

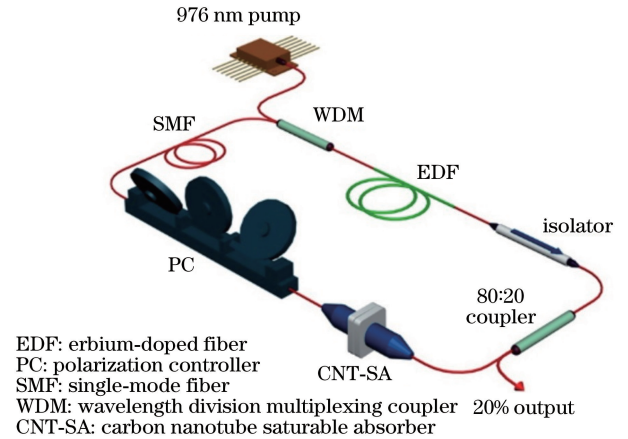


图1 基于CNT-SA的L波段可切换双波长被动锁模光纤激光器的实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of L-band switchable dual-wavelength passively mode-locked fiber laser based on CNT-SA

## 3 实验结果

实验中L波段锁模主要通过优化EDF的长度来实现。相关的研究表明,可以通过改变增益光纤的长度来调整增益光纤的发射波长<sup>[29]</sup>。这主要是因为随着EDF长度的增加,所产生的带内吸收更强,粒子数反转减弱,导致激光器的发射波长向长波长方向移动<sup>[30-31]</sup>。根据Franco等<sup>[29]</sup>研究得到的增益光纤长度与发射波长的关系对激光器增益光纤的长度进行优化。在实验中发现,当光纤激光器的其他条件保持不变,EDF的长度从大约7 m减小到约3.3 m时,锁模光纤激光器光谱的中心波长从大约1599.5 nm变换到约1566.3 nm。而将EDF的长度增加到约9 m时,无法实现稳定的脉冲输出;将激光器增益光纤的长度调整到约6.93 m时,可以实现稳定锁模。因此,激光腔的总长度约为23.98 m,激光腔的净色散为-0.325 ps<sup>2</sup>。

当抽运功率达到约57.3 mW时,激光器自启动锁模<sup>[32-34]</sup>,输出功率约为290  $\mu\text{W}$ ,锁模光纤激光器输出光谱的中心波长为1596.6 nm,图2(a)为相应

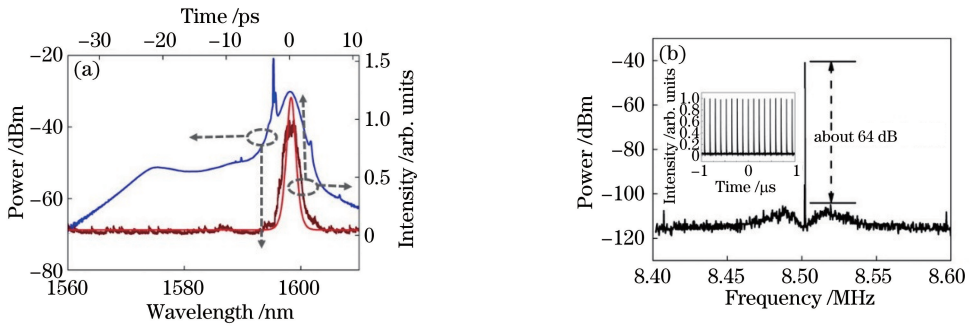


图 2 抽运功率约为 57.3 mW,激光器的中心波长为 1596.6 nm 时的输出结果。

(a)输出光谱、脉冲的自相关信号及双曲正割拟合曲线;(b)频谱图(插图为脉冲序列)

Fig. 2 Output of mode-locked fiber laser centered at 1596.6 nm when pump power is about 57.3 mW. (a) Optical spectrum, autocorrelation signal of pulse, and hyperbolic secant fitting curve; (b) frequency spectrum (insert is impulse sequence)

的光谱图和脉冲自相关信号图。可以看出:激光器输出光谱的 3 dB 光谱宽度约为 2.34 nm;在双曲正割拟合近似下,脉冲自相关信号的脉冲宽度达到了约 1.8 ps。时间带宽积为 0.495,大于转换极限 0.315,表明输出脉冲为啁啾脉冲,这是因为激光器输出端在增益光纤(正常色散光纤)之后<sup>[15]</sup>。为了研究锁模光纤激光器的稳定性,本实验还测量了相应的激光频谱。如图 2(b),在大约 8.50 MHz 的基频下,测量了输出脉冲序列的激光频谱图,信噪比达到约 64 dB,表明激光器在波长为 1596.6 nm 时的锁模较稳定。

增益介质中粒子数反转率也会随着抽运功率变化,而粒子数反转率会引起截面的净增益变化,从而实现了发射波长的切换<sup>[29]</sup>。从激光器随抽运功率变化的放大自发辐射(ASE)谱可以看到:当抽运功率较小时,激光器增益谱在 1597 nm 处增益较大,在 1573 nm 处增益较小;随着抽运功率逐渐增大,

这两处的增益基本相等;再继续增大抽运功率时,1573 nm 处的增益比 1597 nm 处的增益大。当抽运功率增加到约 67.1 mW 时,输出功率约为 976 μW,激光器输出光谱的中心波长从 1596.6 nm 切换到 1572.9 nm,如图 3(a)所示。激光器光谱的 3 dB 宽度约为 3.68 nm,脉冲宽度约为 1.80 ps,时间带宽积约为 0.799。图 3(b)为锁模光纤激光器在中心波长为 1572.9 nm 时输出的激光频谱图,对应的基本重复频率约为 8.50 MHz,信噪比约为 62 dB,表明锁模激光输出较为稳定。图 3(b)的插图为中心波长为 1572.9 nm 光谱对应的脉冲序列。值得注意的是,当抽运功率从大约 67.1 mW 降低到大约 57.3 mW 时,锁模光纤激光器的中心波长从 1596.6 nm 到 1572.9 nm 的切换是可逆的。当保持抽运功率不变时,通过调节 PC 的状态,即改变激光腔的双折射<sup>[35]</sup>,激光器的中心波长可以在 1585.1~1596.6 nm 范围内动态调节。

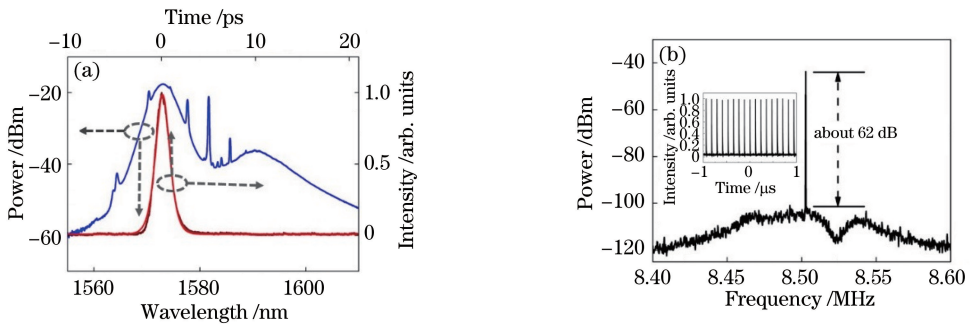


图 3 抽运功率约为 67.1 mW,激光器的中心波长为 1572.9 nm 时的输出结果。

(a)输出光谱、脉冲的自相关信号及双曲正割拟合曲线;(b)频谱图(插图为脉冲序列)

Fig. 3 Output of mode-locked fiber laser centered at 1572.9 nm when pump power is about 67.1 mW. (a) Optical spectrum, autocorrelation signal of pulse, and hyperbolic secant fitting curve; (b) frequency spectrum (insert is impulse sequence)

该激光器除了可以实现在 L 波段单波长切换锁模外,当抽运功率被设置在上述两个锁模状态的

抽运阈值之间时,可以观察到双波长锁模。当抽运功率约为 64.8 mW 时,激光器可以在 1572.3 nm 和

1597.1 nm 处同时锁模,输出功率约为 845  $\mu\text{W}$ ,分别对应图 4(a)中通道 1 和通道 2 的输出光谱。两个波长的间隔约为 24.8 nm。双波长锁模光纤激光器光谱在 1572.3 nm 和 1597.1 nm 处的 3 dB 光谱宽度分别约为 4.68 nm 和 3.24 nm。相应的脉冲序列如图 4(b)所示,在同一谐振腔内产生两种脉冲序列。幅度较高和较低的相邻脉冲的时间间隔分别约为 0.116  $\mu\text{s}$  和 0.0107  $\mu\text{s}$ 。0.116  $\mu\text{s}$  的时间间隔正好等于激光在谐振腔内的往返时间,对应的基本重复频率约为 8.50 MHz,这与激光器的腔长正好对应。而 0.0107  $\mu\text{s}$  的时间间隔对应的重复频率约为 93.53 MHz,是基本重复频率的 11 倍,表明其相应的脉冲为 11 阶谐波锁模。为了监测双波长锁模光纤激光器的稳定性,对该激光器的输出光谱和输出功率进行 6 h 连续监测,结果如图 5 所示,没有观察到明显的波长偏移或峰值功率波动,说明该激光器的双波长锁模稳定性较好。由于抽运功率和输出功率是被动锁模光纤激光器的重要参数,将不同输出

状态下激光器的抽运功率与输出功率汇总到表 1。在 1573 nm 波段激光器的最大转换效率约为 1.5%。

为了获得脉冲序列和光谱中心波长的对应关系,在激光器输出端插入一个带通滤波器(BPF)。BPF 的带宽约为 17 nm,中心波长约为 1572 nm。图 4(c)、(d)所示分别为在激光器输出端插入 BPF 后激光器输出的光谱和脉冲序列。如图 4(c)所示,中心波长为 1572.9 nm 的光谱可通过,中心波长为 1597.1 nm 的光谱被滤除。图 4(c)插图所示为滤除后光谱对应的脉冲自相关信号,脉冲宽度约为 1.83 ps。如图 4(d)所示,脉冲序列的周期约为 0.0107  $\mu\text{s}$ ,表明中心波长为 1572.9 nm 的光谱对应的重复频率约为 93.53 MHz,为 11 阶谐波锁模。对比图 4(b)和图 4(d),可以得出中心波长为 1597.1 nm 的光谱对应的脉冲序列为单脉冲,重复频率约为 8.50 MHz。两个中心波长对应的脉冲序列具有不同的重复频率,其成因主要是群速度色散<sup>[19]</sup>。

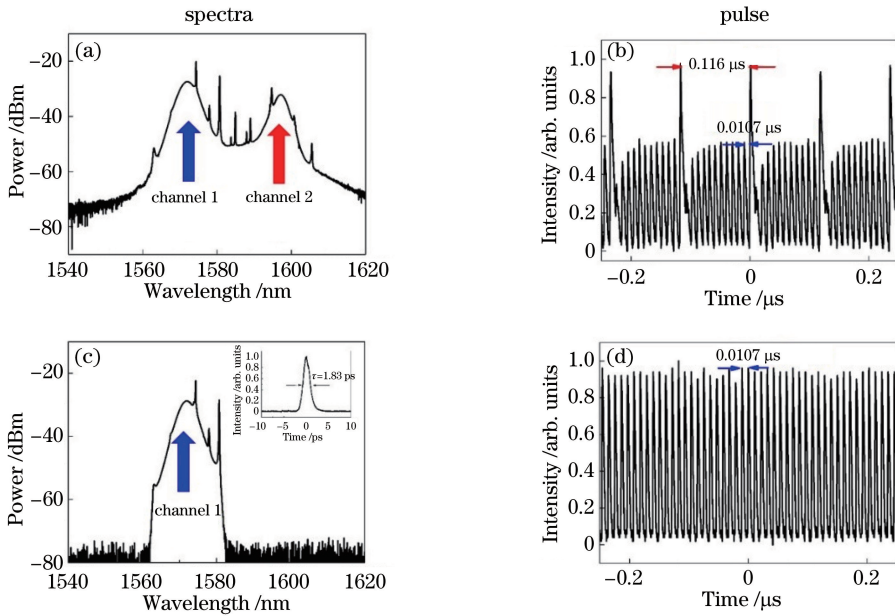


图 4 抽运功率约为 64.8 mW 时双波长锁模光纤激光器的输出。(a)(b)经过滤波器前的输出; (c)(d)经过滤波器后的输出,(c)插图为脉冲的自相关信号

Fig. 4 Output of dual-wavelength mode-locked fiber laser when pump power is about 64.8 mW.

(a)(b) Output before filter; (c)(d) output after filter, and insert in Fig. 4(c) shows autocorrelation signal of pulse

表 1 不同状态下抽运功率与输出功率的关系

Table 1 Relationship between pump power and output power at different states

Output state	Continuous wave	1597 nm-band	Dual-wavelength	1573 nm-band
Pump power /mW	56.5	57.3	64.8	67.1
Output power / $\mu\text{W}$	243	290	845	976

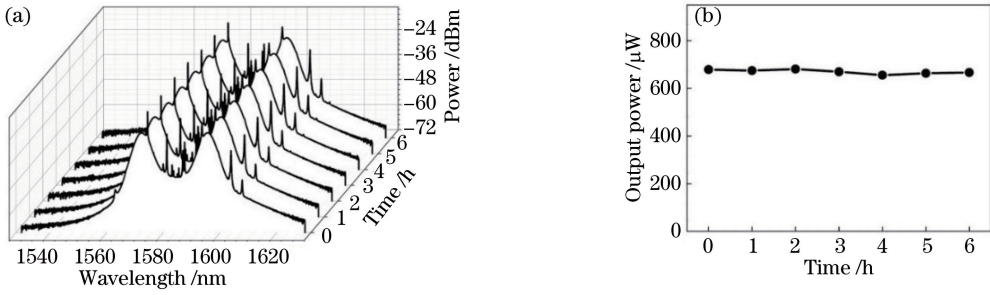


图 5 L 波段双波长锁模光纤激光器稳定性测试结果。(a)光谱;(b)输出功率

Fig. 5 Stability test results of L-band dual-wavelength mode-locked fiber laser. (a) Spectra; (b) output power

## 4 仿真结果与讨论

为了研究增益光纤对激光器形成 L 波段可切换双波长锁模的作用机理,基于非线性薛定谔方程对锁模光纤激光器进行数值模拟。锁模光纤激光器的光脉冲传输方程可表示为

$$\frac{\partial A(\xi, T)}{\partial \xi} + \frac{i}{2} \left( \beta^{(2)} + ig \frac{1}{\Omega_g^2} \right) \frac{\partial^2 A(\xi, T)}{\partial T^2} = i\gamma |A(\xi, T)|^2 A(\xi, T) + \frac{g}{2} A(\xi, T), \quad (1)$$

式中: $A(\xi, T)$ 为脉冲包络的振幅; $\xi$ 为脉冲沿光纤传播的距离; $T$ 为基于脉冲持续时间的延时系; $\beta^{(2)}$ 为群速度色散参数; $\gamma$ 为非线性系数; $\Omega_g$ 为增益带宽; $g$ 为增益。

$$g = g_0 \exp(-E_p/E_s), \quad (2)$$

式中: $g_0$ 为小信号增益; $E_p$ 为脉冲能量; $E_s$ 为增益饱和能量。饱和吸收体的透射率  $T(I)$  可表示为

$$T(I) = 1 - [a_0 / (1 + I/I_{\text{sat}}) + a_{\text{ns}}], \quad (3)$$

式中: $I$ 为脉冲的瞬时强度; $I_{\text{sat}}$ 为饱和吸收体的饱和强度; $a_{\text{ns}}$ 为非饱和和损耗; $a_0$ 为饱和吸收体的调制深度,即饱和吸收体的透射对比度。

锁模光纤激光器的数值模拟模型与本实验的装置图(图 1)相似,光学器件的顺序依次是 HI1060 光纤、EDF、光耦合器、CNT-SA 和 SMF。本研究选用分步傅里叶算法来求解数值模拟模型。数值模拟的参数和实验参数相同,其中光纤参数如表 2 所示,碳纳米管的饱和吸收体调制深度设置为 5%。考虑到 EDF 的增益特性与本实验中观测到的输出光谱在 1572 nm 波段和 1597 nm 波段切换的实验结果,在数值模拟中假设 EDF 的增益光谱在 1572 nm 和 1597 nm 附近有两个峰。因为 EDF 的增益系数遵循洛伦兹函数分布<sup>[36]</sup>,所以仿真中用中心波长分别为 1572 nm 和 1597 nm 的两个洛伦兹函数叠加形成的双峰状轮廓滤波器来对增益谱建模<sup>[37]</sup>。在数

值模拟时,滤波器放在增益光纤之后,以模拟 EDF 增益谱的滤波特性,进而可以通过调整这两个洛伦兹传输函数的幅度来研究抽运功率对激光器锁模的影响<sup>[17]</sup>。所有模拟的起始信号都是随机信号,光谱演变的循环圈数设置为 600。

表 2 数值模拟中设置的光纤参数

Table 2 Fiber parameters in numerical simulation

Fiber type	$\beta^{(2)} / (\text{ps}^2 \cdot \text{km}^{-1})$	$\gamma / (\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	$L / \text{m}$	$g_0$
EDF	14.5	1.00	6.93	4
HI1060	-7.0	1.50	0.95	0
SMF	-26.0	1.09	16.10	0

如图 6(a)的插图所示,设定 1597 nm 波长处的透射率比 1572 nm 处的透射率约大 30%,经过 300 圈循环后,1597 nm 波段处锁模光纤激光器的光谱逐渐稳定,3 dB 光谱宽度约为 5.4 nm,并且在时域中获得脉冲宽度约为 1.4 ps 的稳定脉冲。如图 6(b)的插图所示,设定在 1572 nm 波长处的透射率比在 1597 nm 处的透射率约大 30%,经过 300 圈循环后,1597 nm 波段处锁模光纤激光器的光谱逐渐稳定,3 dB 光谱宽度约为 5.3 nm,脉冲持续时间约为 1.6 ps。当滤波器在 1572 nm 和 1597 nm 处的透射率近似时,如图 6(c)的插图所示,激光器在 1572 nm 波段和 1597 nm 波段同时实现了稳定锁模,3 dB 光谱宽度分别约为 3.2 nm 和 2.9 nm。在时域中,中心波长为 1572 nm 的光谱和 1597 nm 的光谱对应的脉冲宽度分别约为 1.9 ps 和 2.1 ps。仿真结果中 3 dB 光谱宽度和脉冲宽度与实验结果有一定误差<sup>[38-39]</sup>,这主要是因为仿真中将两个洛伦兹函数叠加形成的滤波器放在增益光纤之后,达到等效 EDF 增益谱随抽运功率变化的增益特性的目的,这与实验中 EDF 的增益谱变化略有差异,同时仿真中激光器的器件都是理想化器件,这与实验系统中的器件略有差异。但是仿真结果表明激光器在 L 波段的可切换双波长锁模与增益谱的变化有关,而

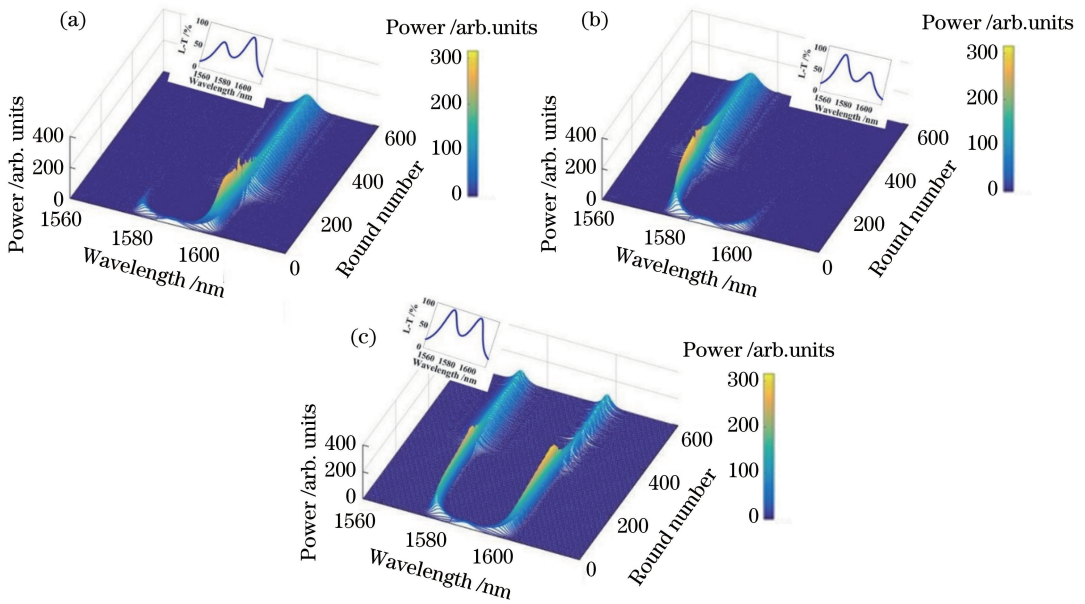


图 6 激光器的数值模拟结果。单波长锁模光谱在(a) 1592 nm 波段和(b) 1572 nm 波段演变的模拟结果；  
(c) 双波长锁模光谱的模拟结果(三个插图为不同的洛伦兹透射率的光谱)

Fig. 6 Numerical simulation results of laser. Simulation results about evolution of single-wavelength mode-locked spectra at (a) 1592 nm-band and (b) 1572 nm-band, respectively; (c) simulation result of dual-wavelength mode-locked spectra (three inserts show spectra of different Lorentz transmissivities)

增益谱的变化与抽运功率相关,这与实验观察结果吻合。

## 5 结 论

报道了基于 CNT-SA 的 L 波段可切换双波长锁模光纤激光器。通过调节抽运功率,实现了锁模光纤激光器在 1572.9 nm 和 1596.6 nm 之间的切换,每个脉冲持续时间约为 1.80 ps。激光器双波长同时锁模的波长间隔约为 24.8 nm。基于扩展非线性薛定谔方程,通过数值模拟进一步研究了 L 波段可切换双波长锁模光纤激光器的形成和演化。数值模拟结果表明,激光器可切换双波长锁模的实现归因于增益谱洛伦兹传输的变化,而增益谱的变化与抽运功率相关,这与实验结果一致,对研究 L 波段可切换双波长光纤锁模激光器具有重要的参考价值。

## 参 考 文 献

[1] Martinez A, Sun Z P. Nanotube and graphene saturable absorbers for fibre lasers [J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 842-845.  
[2] Nishizawa N, Seno Y, Sumimura K, et al. All-polarization-maintaining Er-doped ultrashort-pulse fiber laser using carbon nanotube saturable absorber [J]. Optics Express, 2008, 16(13): 9429-9435.

[3] Du J, Wang Q K, Jiang G B, et al. Ytterbium-doped fiber laser passively mode locked by few-layer molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) saturable absorber functioned with evanescent field interaction [J]. Scientific Reports, 2015, 4: 6346.  
[4] Tamura K, Ippen E P, Haus H A, et al. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. Optics Letters, 1993, 18(13): 1080-1082.  
[5] Sun Z, Rozhin A G, Wang F, et al. L-band ultrafast fiber laser mode locked by carbon nanotubes [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(6): 061114.  
[6] Wang G D, Yang G, Liu Y G, et al. Soliton bundles and high-order harmonic mode-locked in Tm-doped fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0801011.  
王光斗, 杨光, 刘艳格, 等. 掺铥光纤激光器中的孤子束和高阶谐波锁模 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0801011.  
[7] Zhang Y J, Liu J, Wang P. All-fiber wavelength-tunable passively mode-locked thulium-doped fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1001003.  
张怡静, 刘江, 王璞. 全光纤结构波长可调谐被动锁模掺铥光纤激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1001003.  
[8] Wang J Z, Liang X Y, Hu G H, et al. 152 fs nanotube-mode-locked thulium-doped all-fiber laser

- [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28885.
- [9] Zhu X J, Wang C H, Liu S X, *et al.* Switchable dual-wavelength and passively mode-locked all-normal-dispersion Yb-doped fiber lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(14): 956-958.
- [10] Song Q Y, Chen G X, Tan X L, *et al.* Multi-wavelength passively mode-locked laser based on single-walled carbon nanotube[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0102002.  
宋秋艳, 陈根祥, 谭晓琳, 等. 基于单壁碳纳米管的多波长被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102002.
- [11] Feng S C, Ren W H, Chen M Y, *et al.* Multi-wavelength fiber laser employing twin-core fiber filter and nonlinear polarization rotation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0605006.  
冯素春, 任文华, 陈曼雅, 等. 基于双芯光纤滤波器和非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605006.
- [12] Xu Z W, Zhang Z X. All-normal-dispersion multi-wavelength dissipative soliton Yb-doped fiber laser [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(8): 085105.
- [13] Zhang Z X, Xu Z W, Zhang L. Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton generation in an all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser with birefringence fiber filter [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26736-26742.
- [14] Moon D S, Sun G Y, Lin A X, *et al.* Tunable dual-wavelength fiber laser based on a single fiber Bragg grating in a Sagnac loop interferometer[J]. Optics Communications, 2008, 281(9): 2513-2516.
- [15] Li X H, Wang Y S, Zhao W, *et al.* All-normal dispersion, figure-eight, tunable passively mode-locked fiber laser with an invisible and changeable intracavity bandpass filter[J]. Laser Physics, 2011, 21(5): 940-944.
- [16] Zhao X, Zheng Z, Liu L, *et al.* Switchable, dual-wavelength passively mode-locked ultrafast fiber laser based on a single-wall carbon nanotube mode locker and intracavity loss tuning [J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1168-1173.
- [17] Han D D, Zeng C. Investigations of switchable fiber soliton laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. Optics Communications, 2014, 319: 25-30.
- [18] Zhao J Q, Wang Y G, Ruan S C, *et al.* Three operation regimes with an L-band ultrafast fiber laser passively mode-locked by graphene oxide saturable absorber [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2014, 31(4): 716-722.
- [19] Rosa H G, Steinberg D, Thoroh de Souza E A. Explaining simultaneous dual-band carbon nanotube mode-locking erbium-doped fiber laser by net gain cross section variation[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28711-28718.
- [20] Zhu P, Sang M, Gao Y, *et al.* Wavelength switchable passive mode-locking fiber laser based on single-wall carbon nanotube[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 0202005.  
朱攀, 桑梅, 高杨, 等. 基于单壁碳纳米管的波长可切换被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202005.
- [21] Guo B, Yao Y, Yan P G, *et al.* Dual-wavelength soliton mode-locked fiber laser with a WS<sub>2</sub>-based fiber taper[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(3): 323-326.
- [22] Wang X D, Luo Z C, Liu M, *et al.* Wavelength-switchable femtosecond pulse fiber laser mode-locked by silica-encased gold nanorods [J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(4): 045101.
- [23] Huang S S, Wang Y G, Yan P G, *et al.* Tunable and switchable multi-wavelength dissipative soliton generation in a graphene oxide mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2014, 22(10): 11417-11426.
- [24] Lin H Q, Guo C Y, Ruan S C, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton operation of a weak-birefringence all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(5): 1501807.
- [25] Yu Chamorovskiy A, Marakulin A V, Kurkov A S, *et al.* Tunable Ho-doped soliton fiber laser mode-locked by carbon nanotube saturable absorber [J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(8): 602-606.
- [26] Yan Z Y, Li X H, Tang Y L, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength Tm-doped mode-locked fiber laser by nonlinear polarization evolution [J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4369-4376.
- [27] Yan Z Y, Tang Y L, Sun B, *et al.* Switchable multi-wavelength Tm-doped mode-locked fiber laser [J]. Optics Letters, 2015, 40(9): 1916-1919.
- [28] Jiang K, Wu Z C, Fu S N, *et al.* Switchable dual-wavelength mode-locking of thulium-doped fiber laser based on SWNTs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(19): 2019-2022.
- [29] Franco P, Midrio M, Tozzato A, *et al.* Characterization and optimization criteria for filterless erbium-doped fiber lasers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1994, 11(6): 1090-1097.
- [30] Luo J L, Li L, Ge Y Q, *et al.* L-band femtosecond fiber laser mode locked by nonlinear polarization rotation [J]. IEEE Photonics Technology Letters,

- 2014, 26(24): 2438-2441.
- [31] Jia H T, Wang J L, Teng H, *et al.* Sub-picosecond L-band erbium-doped all fiber mode-locked laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1101008. 贾浩天, 王军利, 滕浩, 等. 亚皮秒 L 波段掺铒全光纤锁模激光器 [J]. 中国激光, 2016, 43 (11): 1101008.
- [32] Yu Z H, Song Y R, Dong X Z, *et al.* Mode locked Er-doped fiber laser with single-wall carbon nanotube saturable absorber[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(s2): s21403.
- [33] Sun Z P, Hasan T, Wang F Q, *et al.* Ultrafast stretched-pulse fiber laser mode-locked by carbon nanotubes[J]. Nano Research, 2010, 3 (6): 404-411.
- [34] Yamashita S, Inoue Y, Maruyama S, *et al.* Saturable absorbers incorporating carbon nanotubes directly synthesized onto substrates and fibers and their application to mode-locked fiber lasers [J]. Optics Letters, 2004, 29(14): 1581-1583.
- [35] Zhang H, Tang D Y, Zhao L M, *et al.* Compact graphene mode-locked wavelength-tunable erbium-doped fiber lasers: from all anomalous dispersion to all normal dispersion [J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(8): 591-596.
- [36] Agrawal G P. Applications of nonlinear fiber optics [M]. Jia D F, Yu Z H. Transl. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 674-682. Govind P, Agrawal. 非线性光纤光学原理及引用 [M]. 贾东方, 余震虹, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 674-682.
- [37] Becker P C, Olsson N A, Simpson J R. Erbium doped fiber amplifiers, fundamentals and technology [M]. San Diego: Academic Press, 1999:132-145.
- [38] Chong A, Buckley J, Renninger W, *et al.* All-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. Optics Express, 2006, 14(21): 10095-10100.
- [39] Yan D, Li X L, Zhang S M, *et al.* L-band wavelength-tunable dissipative soliton fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 739-748.