

基于全光纤梳状滤波器的被动锁模激光器性能研究

张梦*, 李慧铮

北京航空航天大学电子信息工程学院光电实验室, 北京 100191

摘要 滤波效应对脉冲的形成、波形调控和动态传输有重大的影响。展示了一种以全光纤马赫-曾德尔干涉仪作为紧凑梳状滤波器的多功能掺铥光纤激光器, 实现了多波长连续激光输出、多波长锁模激光脉冲输出, 在 1842~1898 nm 光谱范围内可调谐输出单波长锁模激光并同时获得四波长锁模脉冲。采用拉锥技术制备了全光纤微结谐振器, 在掺铥光纤激光器腔中, 获得了束缚态孤子, 且锁模状态可实现从基频状态到谐波锁模的切换。通过调控谐振腔功率以及偏振状态, 实现了 24 阶谐波锁模, 其脉冲形态仍是束缚态孤子。实验结果以及数值分析结果表明, 滤波效应对脉冲形态有显著的影响。

关键词 激光器; 锁模激光器; 多波长锁模激光器; 滤波效应; 梳状滤波器; 束缚态孤子

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1901004

1 引言

光纤梳状滤波器在超快光学、光信息处理、光纤传感、激光加工、激光制导等领域都有重要的应用。作为光纤激光器的调控器件, 滤波器在激光的产生、孤子的形成、脉冲波形的调控等方面具有不可替代的作用, 其是可调谐、窄带宽、多波长光纤激光器的关键元件。因此, 滤波效应对脉冲产生和传输的研究及新型滤波器件的制作有十分重要的价值。

利用光纤的耦合和光纤干涉仪的选频作用可以构建光纤滤波器。目前研究较多的光纤滤波器有马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 光纤滤波器、法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 光纤滤波器、光纤光栅滤波器、微环谐振器等。

滤波效应对锁模光纤激光器中的孤子形成和稳定及波形调控有着十分重要的作用。一方面, 滤波效应可以影响不同的脉冲特性^[1], 比如带宽可调谐的滤波器会影响脉冲的展宽和压缩^[2]; 基于双折射的光学滤波器能够输出双波长锁模激光^[3]; 窄带滤波器能够降低正色散激光器的脉冲不稳定性, 同时耗散孤子会演变为自相似孤子^[4]。另一方面, 滤波效应对激光器的孤子类型和多脉冲不稳定性有影响^[5]; 在色散管理型光纤激光器中, 滤波效应会导致脉冲劈裂^[6]。在提升重复频率方面, 滤波器也有自己独特的作用: 不仅可以降低孤子分裂阈值, 实现谐波锁模, 还能诱导耗散四波混频, 实现千百兆超高重复频率脉冲序列输出^[7]。

本文选择全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI) 和微结谐振器 (MKR) 两种滤波器, 将其应用于环形光纤激光器腔中产生不同的锁模脉冲。基于 MZI, 被动锁模激光器实现了单波长可调谐、多波长连续激光输出以及多波长脉冲序列输出。基于 MKR, 被动锁模激光器实现了多脉冲形态和 24 阶谐波锁模输出, 同时通过在孤子腔中加入滤波器, 模拟仿真了脉冲形态变化。

2 基本原理

2.1 光纤滤波器

光纤滤波器是选择性地透过一定波长光束的光学器件。马赫-曾德尔干涉仪光纤滤波器如图 1 所示, 两个光纤耦合器 (OC) 与两根长度不完全相等的光纤 (干涉臂) 构成了马赫-曾德尔干涉仪, 其结构简单, 易于实现。

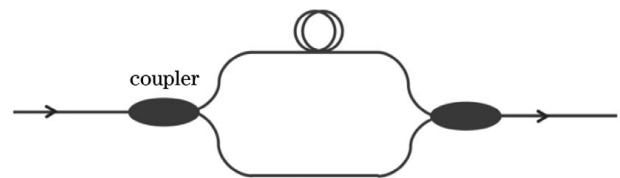


图 1 马赫-曾德尔干涉仪光纤滤波器结构图

Fig. 1 Structural diagram of Mach-zehnder interferometer fiber filter

在输入端接入宽带放大自发辐射 (ASE) 光源, 在输出端光谱仪得到的是梳状谱, 其梳状谱呈正弦形式。

MZI 的自由光谱范围(FSR)由两臂之差决定。

微结谐振器的结构更加紧凑,由拉锥光纤打结而成。微结谐振器的一般几何结构图如图 2 所示,其中 k 为光透过率。当光信号从一端进入光纤后,一部分光沿直线传输,另一部分光进入结中,微结谐振器由一个半径为 R 的结形腔和一段锥形光纤波导组合而成,两路光信号经过耦合区域(虚线框)后发生交换。信号从光纤耦合器进入结形腔并在腔内绕行一周后会获得一个 2π 整数倍的相移,这会引起干涉效应^[8]。MKR 的自由光谱范围取决于结的直径,当直径太大时,无法产生干涉效应。

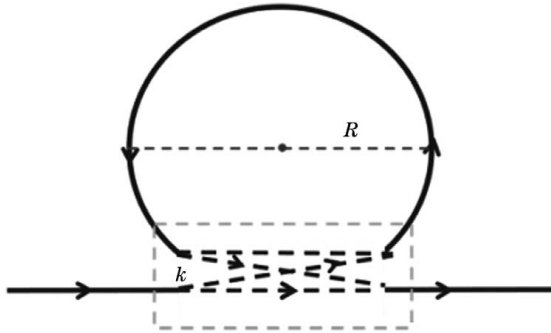


图 2 微结谐振器的结构图

Fig. 2 Structural diagram of MKR

2.2 多波长和多脉冲产生机制

多波长锁模脉冲光纤激光器能够在不同波长处同时产生超短脉冲。通常可以利用调制器、非线性效应、非线性偏振旋转(NPR)或者使用多波长滤波器来得到多波长输出,即需要在腔内加入一个锁模器件和一个滤波器来实现多波长输出^[9]。通过以上提到的方法,激光腔的功率会在不同波长下进行重新分配,有效抑制由增益光纤均匀展宽带来的模式竞争,从而实现多波长激光输出。

而多脉冲是锁模激光器常见的输出状态,是孤子相互作用的结果。孤子的渐近波有振荡的尾部,可以形成弱稳定的多脉冲束缚态孤子。当泵浦功率超过一定阈值时,由于增益带宽的影响,就会产生多脉冲。束缚态孤子以恒定的相位差及稳定的脉冲间距形式存在,多孤子形态与分子结构相似,又被称为孤子分子^[10]。由两个孤子组成的孤子对是束缚态孤子的典型状态。在锁模不稳定的情况下,便会存在连续光,两个距离较远的孤子脉冲会相互作用,这样就会实现谐波锁模^[11]。优化激光的偏振态、泵浦功率等参数,使多脉冲之间能够保持相等的距离,从而使激光器的输出脉冲序列等间距分布。

3 实验与结果分析

3.1 基于 MZI 的多波长锁模光纤激光器

实验首先制备 MZI 光纤滤波器,选用两个耦合器,通过光纤熔接将两臂连接,尽量保证两臂等长。由于全光纤 MZI 光纤滤波器存在波长漂移的问题,

因此在制备时需要将两臂缠绕绑定为一臂,减小不同臂波动带来的波长漂移。当 MZI 的制备完成后,将其并入激光腔内,本实验选用的 MZI 的自由光谱范围为 3 nm,在共振波长处的平均消光比约为 9 dB。

激光腔采用 NPR 和少层黑磷(BP)相结合的混合腔锁模方式。如图 3 所示,谐振腔由 2.4 m 长的掺铥光纤(TDF)、1550 nm/1900 nm 波分复用器(WDM)、隔离器(ISO)、在线起偏器(polarizer)以及输出耦合器(功率比为 50/50 的 OC)组成。使用 1570 nm 连续波激光器泵浦以实现 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出。在腔内使用 ISO 确保单向运行,使用在线起偏器以实现 NPR,使用 MZI 提供梳状滤波效果。整个腔的长度为 14.8 m,激光腔净色散估计为 $-0.4752\ \text{ps}^2$,基本重复频率为 13.5 MHz。

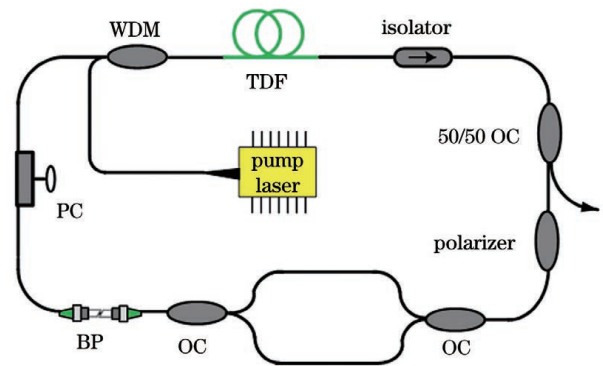


图 3 基于 MZI 的混合激光器的结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of hybrid laser based on MZI

在适当的偏振状态下将泵浦功率逐步升高至 270 mW,实现了多波长连续激光输出,平均输出功率为 2.6 mW。进一步调节偏振控制器(PC),可以发现,中心波长可调谐。图 4 显示了多波长连续激光输出的结果,其中心波长可调谐范围大概为 20 nm。

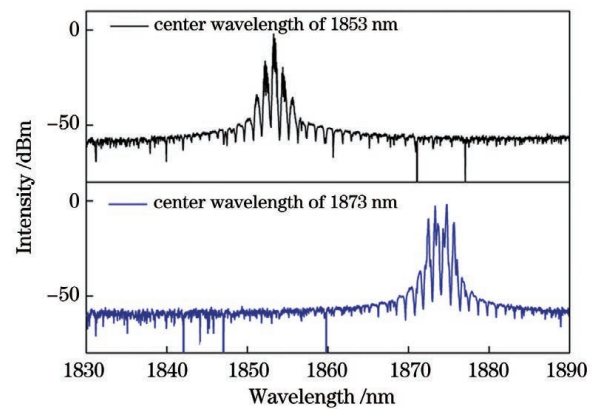


图 4 中心波长可调的多波长连续激光器

Fig. 4 Multi-wavelength continuous laser with adjustable central wavelength

为了获得更多不同的脉冲状态,我们将泵浦功率提高到了 327 mW,通过调节 PC 可以实现单波长锁定但中心波长可调,如图 5(a)所示,其中中心波长为

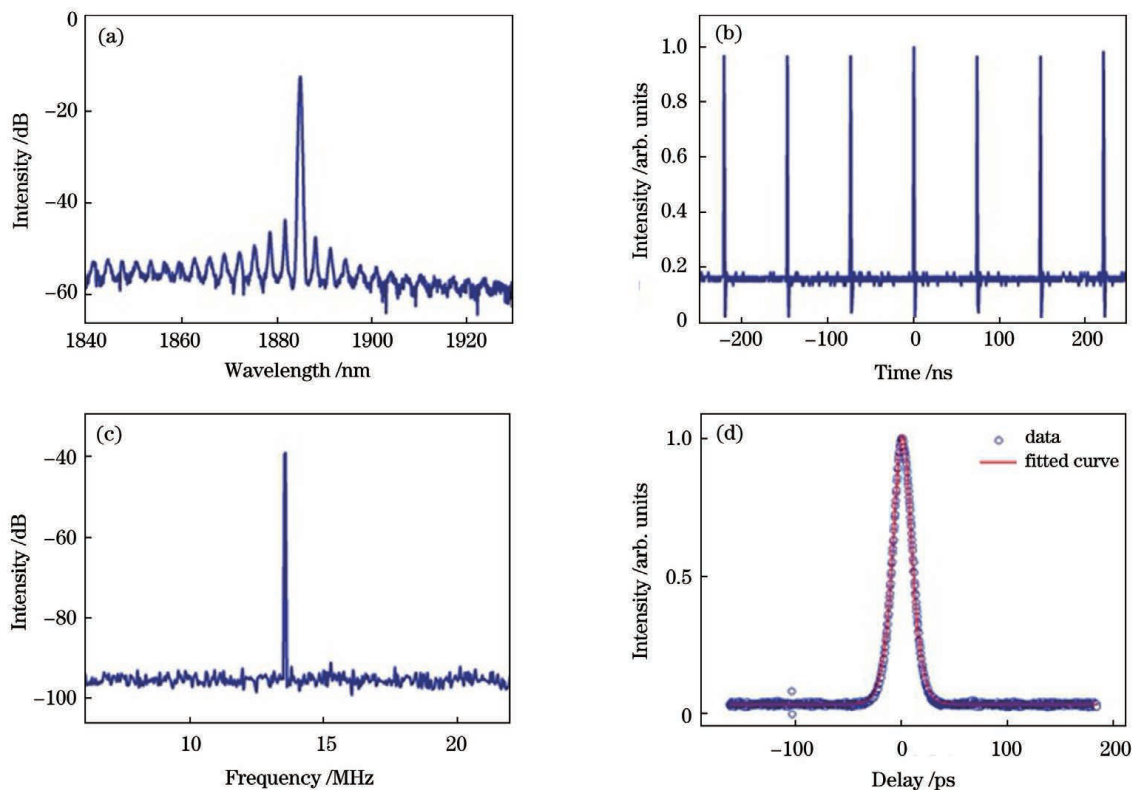


图 5 单波长锁模激光器。(a)光谱图;(b)示波器脉冲序列;(c)频谱图;(d)脉冲自相关曲线

Fig. 5 Single wavelength mode-locked laser. (a) Optical spectrum; (b) oscilloscope pulse train; (c) frequency spectrum; (d) pulse autocorrelation curve

1885.2 nm。如图 5(b)所示,其脉冲序列的重复频率与腔的基频 13.5 MHz 一致。由图 5(c)可以看出,信噪比 >55 dB。由于输出功率低,测试输出脉冲脉宽时先将脉冲放大再将其输入到自相关仪中,用双曲正割拟合自相关曲线,如图 5(d)所示,其脉冲宽度为 13.5 ps。进一步调节 PC,中心波长在 1842~1898 nm 范围内可调谐,可调范围为 56 nm。由于腔内同时存在 NPR 和滤波器,NPR 也会引入滤波效应,且滤波效果明显,使激光器具有较宽的工作波长范围。通过旋转 PC,腔内透过率发生改变,增益光纤的整个有效增益谱从均匀分布变成非均匀分布,从而实现了波长可调谐。

在光谱图中可以看到明显的调制效应。NPR 不仅引入了滤波效应,还能抑制模式竞争,且样品 MZI 的调制深度较大,可实现室温下多波长锁模激光序列的输出。继续加大功率至 400,可以得到双波长锁模激光。两个波长之间的间隔为 MZI 自由光谱范围的整数倍。在光谱图 6(a)中,可测得两个波长的间隔为 3 nm。时域图如图 6(b)所示,在示波器脉冲序列中可以看到两个脉冲。在频谱图[图 6(c)]中,两个频率间隔为 300 Hz。未进行滤波放大时测得其脉宽如图 6(d)所示,脉冲宽度为 11.5 ps。

将功率加大至 420 mW,可以得到不同间隔下的三波长锁模激光,相邻两个波长之间的间隔为 MZI 自由光谱范围的整数倍。图 7 所示为不同波长间隔下的

三波长锁模状态。图 7(a1)~(a3)为三波长锁模激光的光谱图,图 7(b1)~(b3)是其对应的频谱图。继续加大功率至 440 mW,可以得到四波长锁模激光光谱图,如图 7(a4)所示,其频谱图如图 7(b4)所示。图 7(c1)~(c4)为其对应的时域图。由于未对输出的脉冲序列进行滤波,因此利用自相关曲线并不能测出其脉宽。但是,由于功率已达到黑磷的损伤阈值,继续加大功率不仅得不到更多波长,还会击穿黑磷,失去锁模状态。

3.2 基于 MKR 的被动谐波锁模光纤激光器

无论锁模光纤激光器的谐振腔是线形腔还是环形腔,锁模脉冲的基频与谐振腔长度呈反比关系。受限于自身的谐振腔长度,被动锁模脉冲的基频在一般情况下小于 100 MHz。谐波锁模在谐振腔内能够同时传输多个具有相同时间间隔的脉冲,可提高锁模脉冲的重复频率。本节利用滤波器产生的多脉冲,在设计的光纤激光器中实现了稳定的谐波锁模序列输出。

采用火焰刷涂技术从标准普通单模光纤(SMF)中提取超细纤维^[12],通过拉锥机制得直径低至 5 μm 、拉伸长度为 5.5 cm 的超细光纤,再利用锥形光纤打结的方式,制得 MKR。在光纤一端接入 ASE 光源,另一端接入光谱仪,从光谱仪上读取透射谱。本实验选用的样品环直径约为 640 μm ,其插入损耗在 1550 nm 处约为 2 dB,在透射谱中显示的自由光谱范围为 0.8 nm,在共振波长处的平均消光比约为 4 dB。

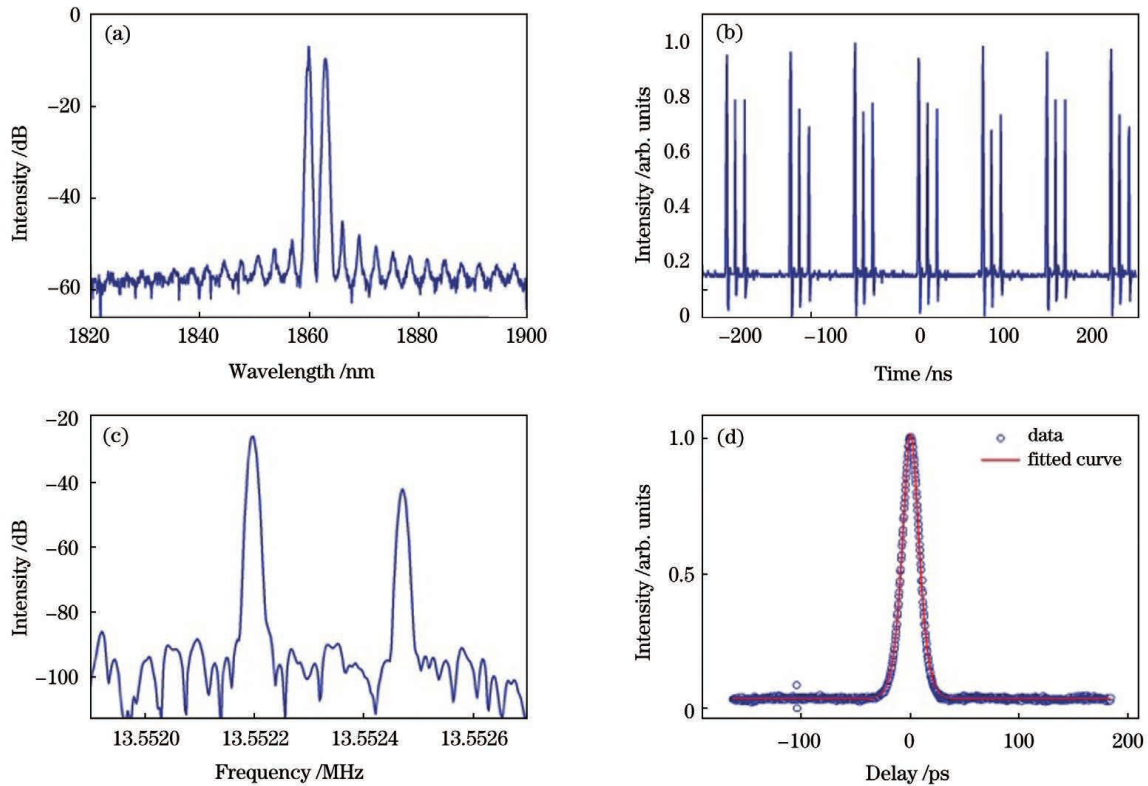


图 6 双波长锁模激光器。(a) 光谱图；(b) 示波器脉冲序列；(c) 频谱图；(d) 脉冲自相关曲线
Fig. 6 Dual-wavelength mode-locked laser. (a) Optical spectrum; (b) oscilloscope pulse train; (c) frequency spectrum; (d) pulse autocorrelation curve

激光腔采用真实的可饱和吸收体锁模。如图 8 所示,谐振腔以 70 cm 长的掺铒光纤(EDF)作为增益介质。光纤激光器的泵浦源为 980 nm 的半导体激光器,泵浦光通过 980 nm/1550 nm WDM 输入腔内。将两片尺寸为 $\sim 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的黑磷薄膜片粘贴在两个光纤跳线端面上,利用法兰盘将跳线连接后接入腔内作为可饱和吸收体。在腔内利用 PC 调节循环光的偏振状态,腔内 20% 的能量通过耦合器被输出到腔外, MKR 用于实现梳状滤波。整个腔的长度为 11.6 m,净腔色散估计为 -0.1418 ps^2 ,基本重复频率为 17.2 MHz。

将泵浦功率增加到 60 mW 时,伴随着腔内逐渐积累的非线性效应,多脉冲状态开始出现,可观测到束缚态锁模^[11],输出功率为 $723 \mu\text{W}$ 。其中,光谱图如图 9(a)所示,可以看出有明显的调制周期,而且此调制周期就是微结谐振器的 FSR,为 0.8 nm,其中心波长为 1558 nm。示波器时域图如图 9(b)所示,可以得到基本重复频率为 17.2 MHz。频谱图如图 9(c)所示,显示信噪比约为 60 dB。通过掺铒光纤放大器(EDFA)测其脉冲自相关曲线,图 9(d)为锁模状态下的自相关曲线,显示脉冲波形为多脉冲束缚态孤子,此时腔内多个相邻脉冲之间的时间间隔为 10.1 ps。我们观察到的多脉冲束缚孤子具有以下特征:在所有多脉冲束缚孤子中,相邻孤子之间具有相同的固定孤子脉冲间隔,并且束缚孤子结构稳定。

Lederer 等^[13]在基于金兹堡-朗道方程的数值模拟中发现,若通过在谐振腔内加入窄带滤波器来限制脉冲带宽,滤波效应会导致脉冲劈裂,孤子的分裂阈值进一步降低,从而产生更多脉冲。我们在同样功率下,将腔内 MKR 移除,由于 MKR 总长度为 30 cm,我们忽略其影响,探究此时孤子腔的锁模状态,如图 10 所示。在同一泵浦功率下,当没有加入 MKR 时,激光腔输出的脉冲形态就是典型的孤子脉冲。图 10(a)显示其中心波长为 1560 nm,由图 10(b)可以得到其基频为 17.7 MHz,由图 10(c)可知其信噪比约为 60 dB,由图 10(d)测得自相关曲线的脉宽为 1.43 ps。

在被动锁模光纤激光器腔的色散、非线性效应、滤波器效应等因素的共同作用下,得到的多个脉冲同时在谐振腔内往返传输,每个脉冲按照相等间距呈均匀分布,多脉冲之间的相位相互匹配,这样就实现了被动谐波锁模。结合谐波锁模技术可实现百 MHz 甚至 GHz 量级的高重复频率超短脉冲的输出。考虑孤子面积理论^[14],孤子的分裂阈值与激光腔的非线性系数成正比。在上述实验中,非线性效应较弱,不容易出现高阶谐波。我们通过增加普通单模光纤的长度来增加非线性效应,从而实现脉冲基本重复频率的提高。在之前腔的基础上增加了 11.5 m 长的 SMF,此时激光腔的基本重复频率为 8.6 MHz。当泵浦功率从 60 mW 增加到 100 mW 时,产生了 8 阶谐波锁模,当功率提高到 150 mW 时产生了 12 阶谐波锁模,其基本

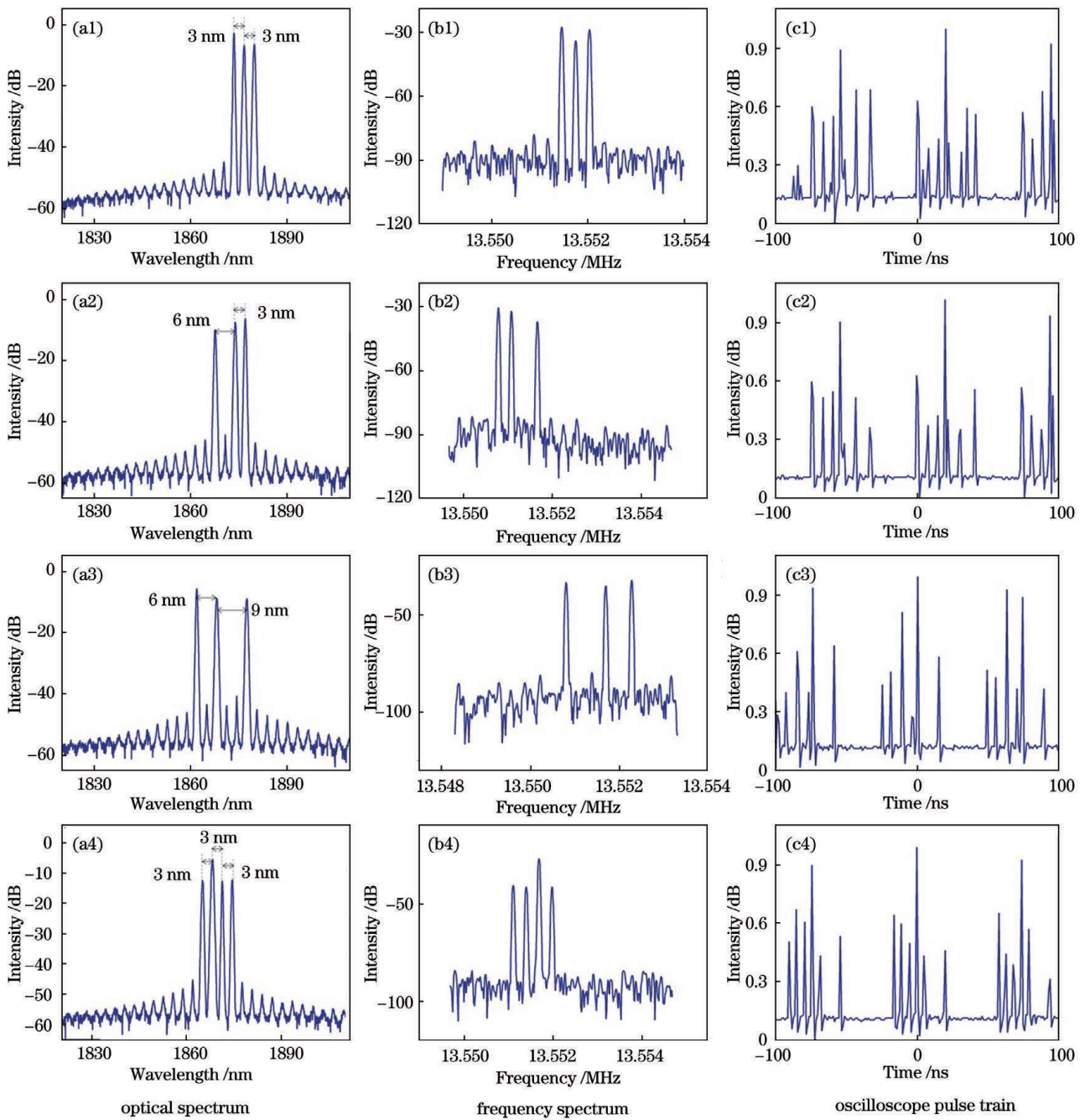


图 7 多波长锁模激光器

Fig. 7 Multi-wavelength mode-locked laser

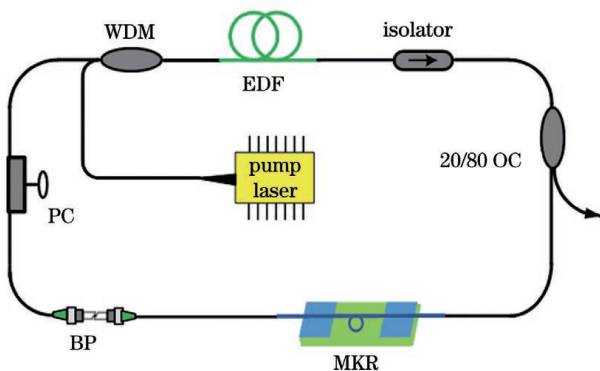


图 8 基于 MKR 的激光器结构示意图

Fig. 8 Structural diagram of laser based on MKR

重复频率为 103.8 MHz。继续增加功率并调节 PC，可以得到 24 阶谐波锁模，此时其基本重复频率为 206.4 MHz，如图 11 所示。

更高阶锁模需要更高的功率以产生更高的频率，但继续增加功率，黑磷会被击穿，失去锁模状态。同时，根据孤子面积理论^[14]，孤子脉冲分裂阈值还与谐振腔的色散有关。在增加 SMF 长度时引入了较高的反常色散，脉冲重复频率不能大幅度提高。因此，加入正色散光纤以继续提高谐波阶数，通过色散管理可以达到最优化的结果。结形谐振器还可以通过耗散四波混频来实现超高重复频率。为了实现超高重复频率，将结形谐振器和可饱和吸收体结合，二维材料与倏逝

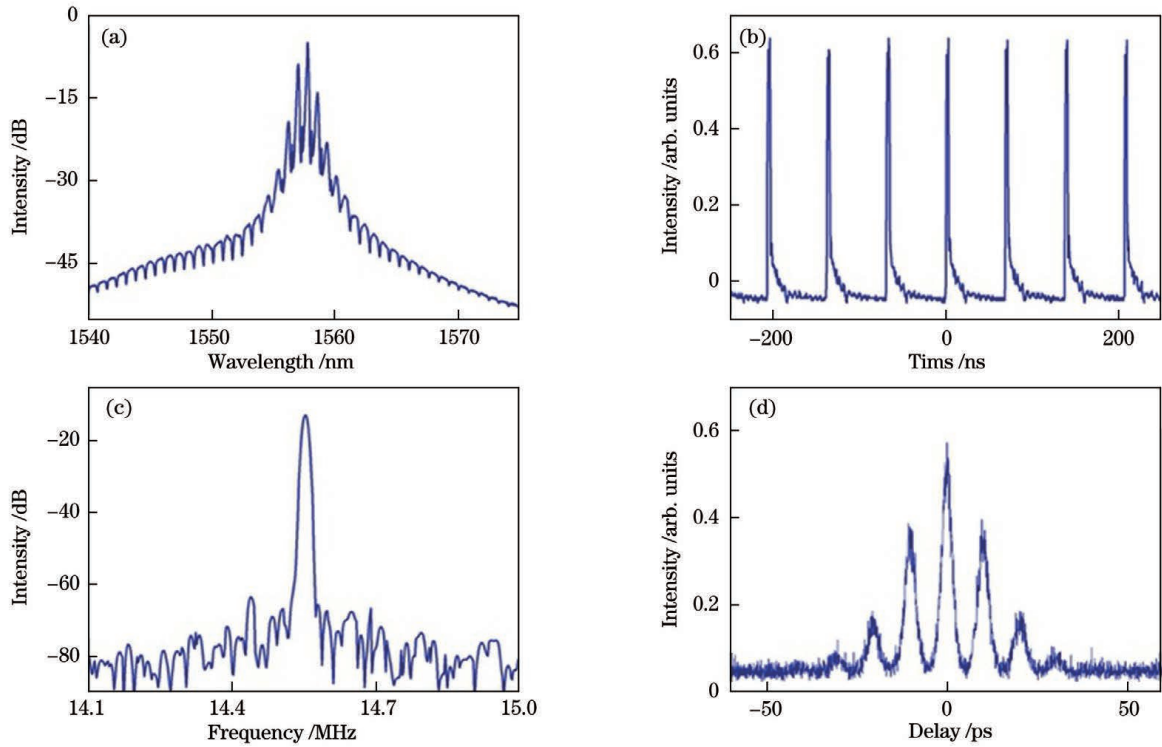


图 9 多脉冲束缚态孤子。(a)光谱图；(b)示波器脉冲序列；(c)频谱图；(d)脉冲自相关曲线
 Fig. 9 Multipulse bound state solitons. (a) Optical spectrum; (b) oscilloscope pulse train; (c) frequency spectrum; (d) pulse autocorrelation curve

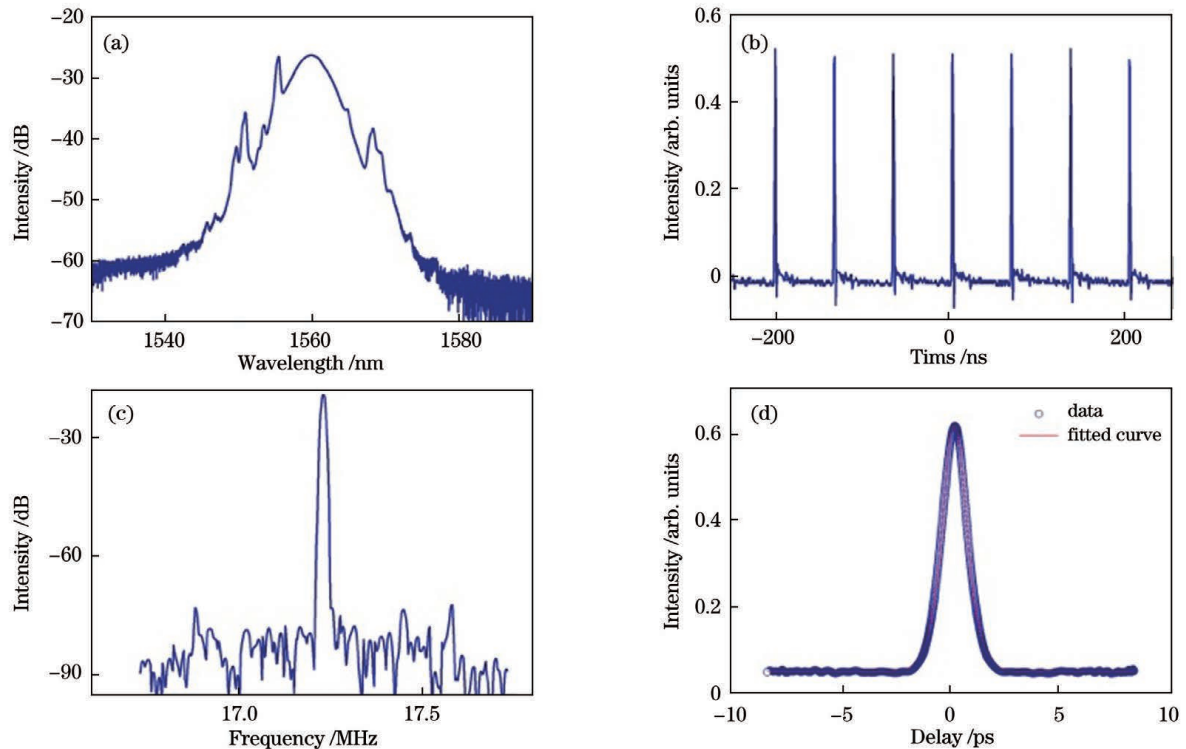


图 10 孤子锁模激光器。(a)光谱图；(b)示波器脉冲序列；(c)频谱图；(d)脉冲自相关曲线
 Fig. 10 Soliton mode-locked laser. (a) Optical spectrum; (b) oscilloscope pulse train; (c) frequency spectrum; (d) pulse autocorrelation curve

场直接作用, 不仅会提高非线性, 还会提高可饱和吸收体的损伤阈值。但是, 因为饱和吸收体材料和微光纤结构本身的稳定性问题, 系统不能保证每次都能达到

理想的状态。层状材料更容易被击穿, 导致无法锁模, 不易实现超高重复频率。

不同的滤波器在激光腔内出现了不一样的结果。

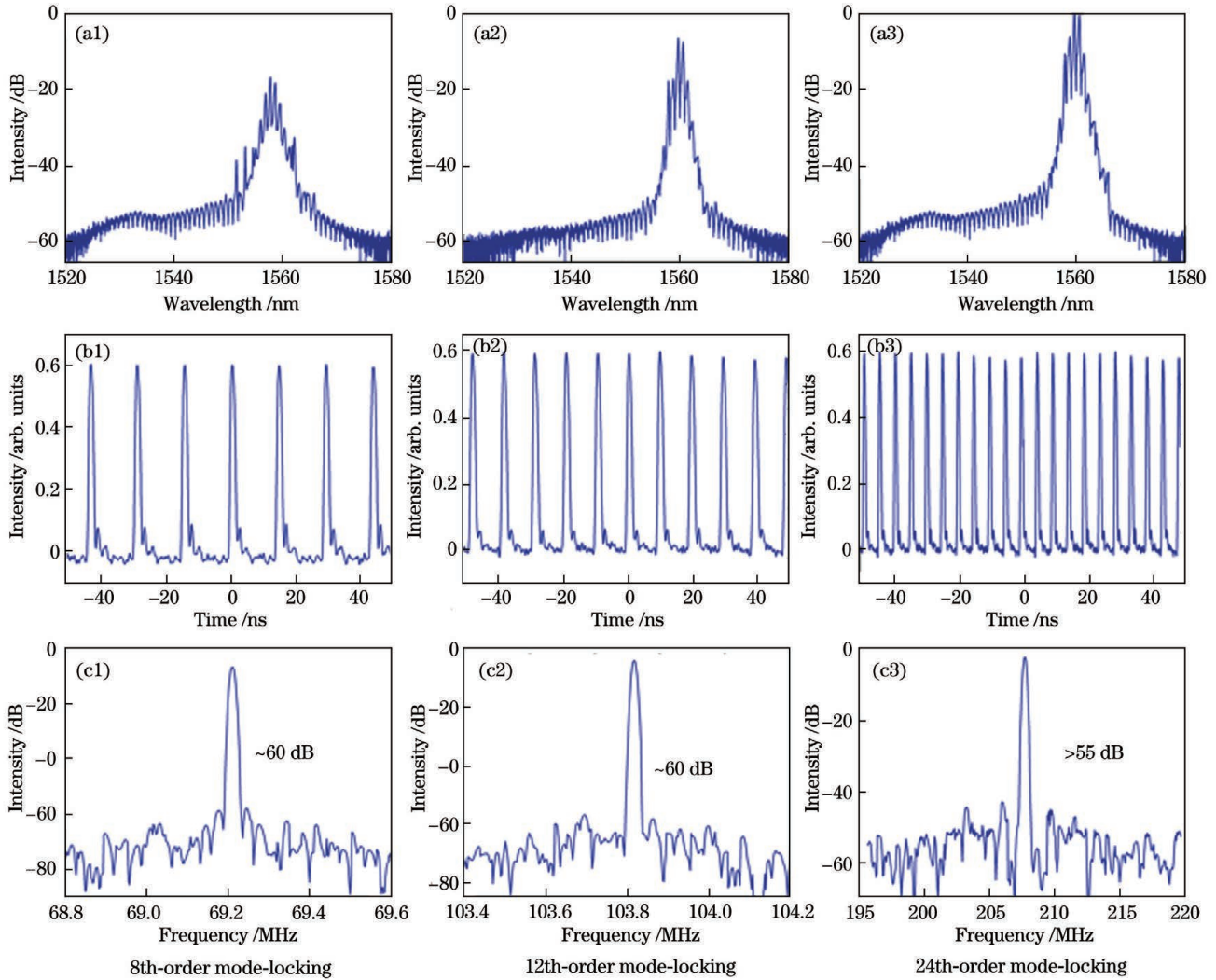


图 11 谐波锁模激光器。(a1)~(a3)光谱图；(b1)~(b3)示波器脉冲序列；(c1)~(c3)频谱图

Fig. 11 Harmonic mode-locked laser. (a1)–(a3) Optical spectrum; (b1)–(b3) oscilloscope pulse train; (c1)~(c3) frequency spectrum

我们认为:首先 $2\ \mu\text{m}$ 激光腔未进行色散管理,可能是由于缺乏强脉冲相互作用,在非色散管理光纤激光器中很难形成多脉冲束缚孤子;其次 $2\ \mu\text{m}$ 腔内的非线性较弱,也不利于形成多脉冲束缚态。 $2\ \mu\text{m}$ 腔内同时存在 NPR 和滤波器,NPR 既会引入滤波效应,还会抑制模式竞争,且 MZI 的调制深度较大,所以我们在室温下实现了稳定的多波长锁模激光序列输出。

3.3 梳状滤波器在激光器中的应用的数值分析

在实验中我们发现,在相同功率下,若通过在谐振腔内加入窄带滤波器来限制脉冲带宽,滤波效应会导致脉冲劈裂,孤子的分裂阈值进一步降低,从而产生多脉冲。我们建立理论模型以进一步研究滤波器对激光器的影响。模拟了脉冲在谐振腔内的传播路线并考虑了腔内各个器件对脉冲的影响。当脉冲在腔内循环一周后,将所得结果作为输入信号进行下一步循环,直到脉冲光场达到稳定的自洽状态^[15]。脉冲在光纤中的传输可以用 NLSE 方程描述为

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = -i \frac{\beta_2}{2} \times \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + i\gamma |U|^2 U + \frac{g}{2} U + \frac{g}{2\Omega_g^2} \times \frac{\partial^2 U}{\partial T^2}, \quad (1)$$

模拟中考虑梳状滤波效应,滤波函数可以表示为

$$T = [1 - \cos(2\pi \cdot \Delta L / \lambda)] / 2, \quad (2)$$

式中: U 是电场包络; β_2 是群速度色散参量; Z 是传播距离; T 是滤波函数; γ 是光纤的非线性参量; Ω_g 是增益带宽; g 是增益光纤的增益, $g = G \exp(-P_{\text{ave}}/P_{\text{Gsat}})$,其中 G 是小信号增益系数, P_{Gsat} 是由泵浦光决定的增益饱和功率, P_{ave} 是平均功率; ΔL 是自由光谱范围,在 MZI 中由两臂之差决定,在 MKR 中与直径有关; λ 是中心波长。

在数值模拟中,初始光信号设置为脉宽为 1 ps 的高斯型脉冲。模拟中利用分步傅里叶法求解方程。参数设置为:光速 $c = 3 \times 10^8\ \text{m/s}$, $G = 1.6\ \text{dB/m}$, 折射率 $n = 1.45$, $\Omega_g = 40\ \text{nm}$ 。在 EDF 中, $\gamma = 3\ \text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, $\beta_2 = 10\ \text{ps}^2/\text{km}$ 。在 SMF 中, $\gamma = 1.1\ \text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, $\beta_2 = -24\ \text{ps}^2/\text{km}$ 。EDF 和 SMF 的长度分别为 2 m

和 10 m。当不加入滤波器时,我们可以得到一个典型的孤子脉冲,如图 12 所示,在光谱图上可以看出有凯利边带。在同样的条件下,加入滤波器,其 FSR 为

1.3 nm,调制深度为 1,此时光谱上有明显的调制现象,在时域上也可以看到稳定的双脉冲。此时,多脉冲的形成主要是由光谱滤波效应导致的。

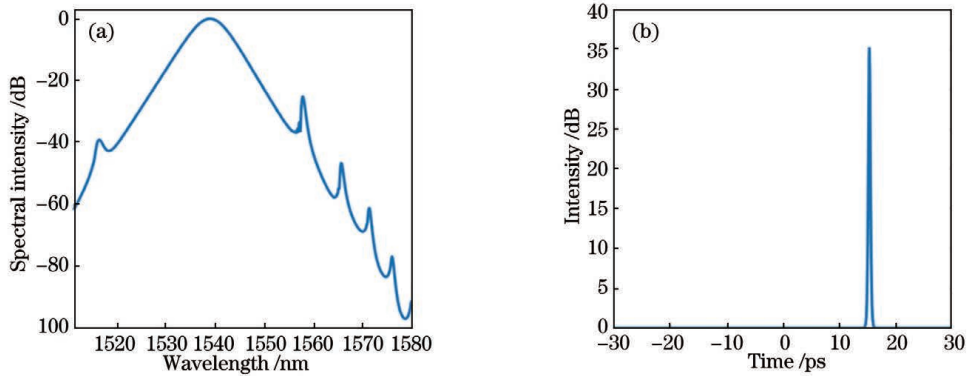


图 12 仿真孤子脉冲。(a)光谱图;(b)时域图

Fig. 12 Simulated soliton pulse. (a) Optical spectrum; (b) time domain diagram

为了进一步验证滤波器是否有效,我们选用了不同 FSR 来进行滤波。由于双脉冲的间隔是由调制周期控制的,FSR 越大,两个脉冲之间的距离越小。我

们分别选用了 0.65、1.30、2.60 nm 的 FSR 来进行对比,实验结果如图 13 所示。三个具有不同 FSR 的滤波器大概在 1000 圈附近达到稳定的自治状态,而且可

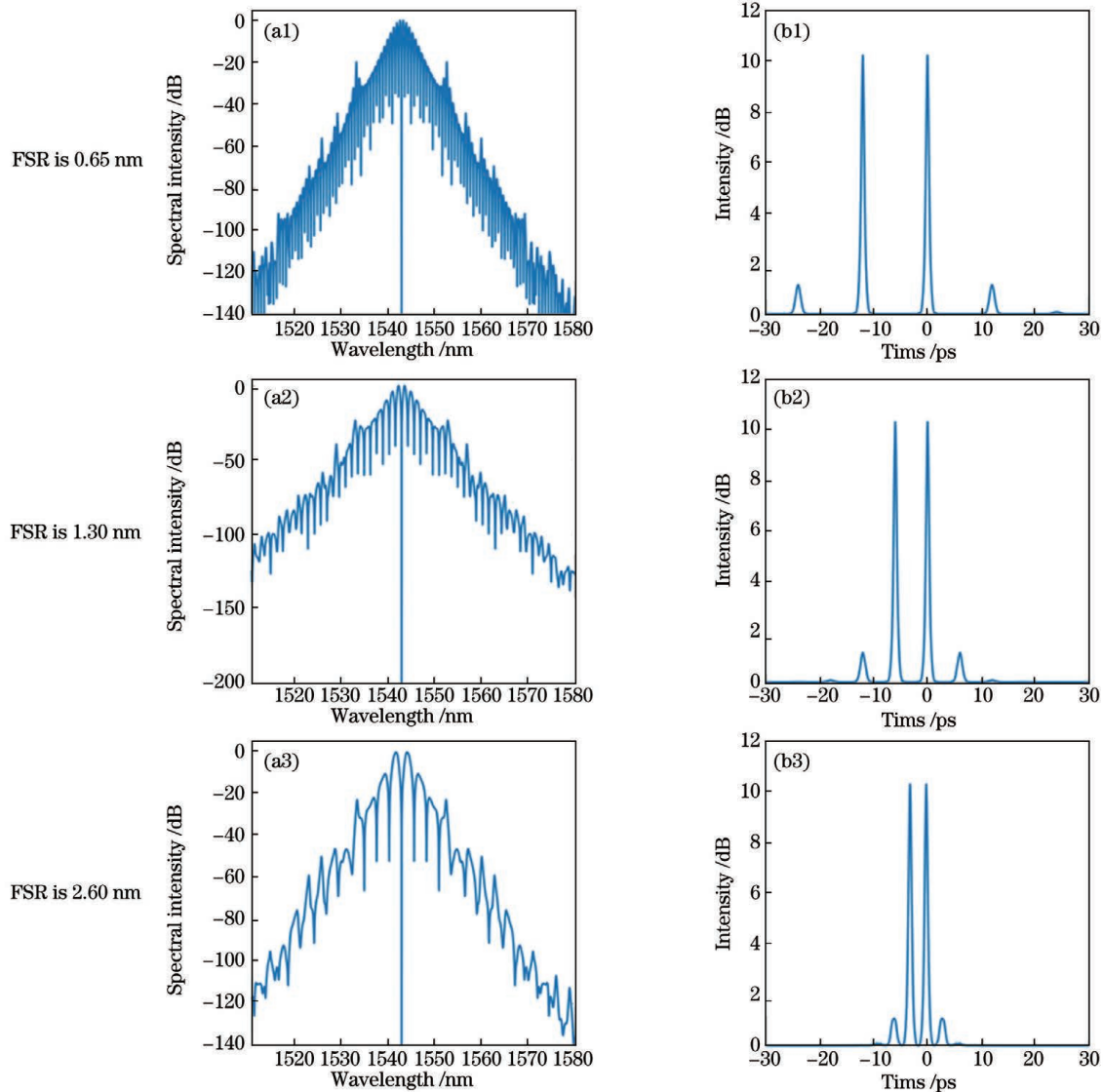


图 13 不同 FSR 下的脉冲序列。(a1)~(a3)光谱图;(b1)~(b3)时域图

Fig. 13 Pulse sequences under different FSRs. (a1)~(a3) Optical spectrum; (b1)~(b3) time domain diagram

可以在同一输入功率以及小信号增益下实现锁定,即弱化了其他因素对多脉冲的影响。从图 13(b1)~(b3)中可以测得其脉冲间隔分别为 12.3、6.1、3.0 ps。

利用非线性薛定谔方程进行数值研究,在光谱上可以看到明显的调制现象,光谱的调制周期取决于 MKR 的自由光谱范围,在时域上双脉冲的间隔与调制周期成反比。改变滤波器的 FSR,在数值仿真中观察到滤波效应会导致脉冲劈裂,因此可得到稳定的双脉冲,且时间间距可调。

4 结 论

展示了一种以 MZI 作为紧凑梳状滤波器的多功能掺铥光纤激光器,实现了多波长连续可调激光输出以及多波长锁模激光脉冲序列输出,最多可以实现四波长锁定。以掺铥光纤激光器为基础,加入 MKR 后观测到束缚态孤子;通过适当调整腔参数,锁模从基频状态切换到谐波锁模;通过调整功率和 PC,得到了 24 阶谐波锁模,其脉冲形态仍是束缚态孤子。通过调整黑磷的层数,可适当增加输入功率,但这会增加整个激光腔的损耗,不利于产生更高阶谐波锁模。数值分析结果显示,滤波效应会导致脉冲劈裂。真实可饱和吸收体的损伤阈值低,层状材料易击穿,后期可使用光沉积方法将材料与微纳光纤结合,提高损伤阈值,使激光腔有更高功率。

参 考 文 献

- [1] Peng J S, Boscolo S. Filter-based dispersion-managed versatile ultrafast fibre laser[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25995.
- [2] Fedotov Y S, Kobtsev S M, Arif R N, et al. Spectrum-, pulsewidth-, and wavelength-switchable all-fiber mode-locked Yb laser with fiber based birefringent filter[J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17797-17805.
- [3] Khanolkar A, Ge X W, Chong A. All-normal dispersion fiber laser with a bandwidth tunable fiber-based spectral filter[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(16): 4555-4558.
- [4] Li D J, Tang D Y, Zhao L M, et al. Mechanism of dissipative-soliton-resonance generation in passively mode-locked all-normal-dispersion fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave*

- Technology, 2015, 33(18): 3781-3787.
- [5] Wang Z Q, Zhan L, Fang X, et al. Spectral filtering effect on mode-locking regimes transition: similariton-dissipative soliton fiber laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(11): 2325-2333.
- [6] Alsaleh M, Uthayakumar T, Tchomgo Felenou E, et al. Pulse breaking through spectral filtering in dispersion-managed fiber lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(2): 276-283.
- [7] Fodil R S, Amrani F, Yang C X, et al. Adjustable high-repetition-rate pulse trains in a passively-mode-locked fiber laser[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(1): 013813.
- [8] 李思成, 许将明, 梁峻锐, 等. 波长间隔、幅度及数目可灵活调谐的多波长光纤激光器[J]. *中国激光*, 2022, 49(13): 1316002.
- Li S C, Xu J M, Liang J R, et al. Multi-wavelength fiber laser with flexible tunable wavelength interval, amplitude and number[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(13): 1316002.
- [9] Liu M, Liu H, Zheng X W, et al. Demonstration of multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a microfiber knot resonator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(14): 1387-1390.
- [10] Tang D, Zhao L, Zhao B. Soliton collapse and bunched noise-like pulse generation in a passively mode-locked fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(7): 2289-2294.
- [11] 林彦吕, 黄梓楠, 黄千千, 等. 基于 Lyot 滤波器的脉冲态可切换掺铥光纤激光器[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1901004.
- Lin Y L, Huang Z N, Huang Q Q, et al. Pulse state switchable ytterbium-doped fiber laser based on lyot filter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1901004.
- [12] 王利镇, 李林军, 童利民. 微纳光纤及其锁模激光应用[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126011.
- Wang L Z, Li L J, Tong L M. Optical microfibers and their applications in mode-locked fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126011.
- [13] Lederer M J, Luther-Davies B, Tan H H, et al. Multipulse operation of a Ti: sapphire laser mode locked by an ion-implanted semiconductor saturable-absorber mirror[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(6): 895-904.
- [14] Nelson L E, Jones D J, Tamura K, et al. Ultrashort-pulse fiber ring lasers[J]. *Applied Physics B*, 1997, 65(2): 277-294.
- [15] 王络, 姚传飞, 李平雪, 等. 用于 3.5 μm 双波长泵浦 Er:ZBLAN 光纤激光器快速仿真的算法优化[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1101004.
- Wang L, Yao C F, Li P X, et al. Algorithm optimization for fast simulation of 3.5 μm dual-wavelength pumped Er: ZBLAN fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1101004.

Performance of Passive Mode-Locked Lasers Based on All-Fiber Comb Filters

Zhang Meng^{*}, Li Huizheng

Optoelectronics Laboratory, School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract

Objective Fiber-comb filters demonstrate significant application potentials in ultrafast optics, optical information processing, fiber sensing, laser processing, and laser guidance. As a class of fiber-laser control devices, filters play an irreplaceable role in laser generation, soliton formation, and pulse-waveform control, which are essential components of tunable, narrow-bandwidth, and multi-wavelength fiber lasers. Therefore, studying the effect of filtering on pulse generation and transmission and manufacturing new filter devices are valuable.

Methods In the experiments, first, a Mach-Zehnder interferometer (MZI) is developed by connecting two arms with

two 3 dB couplers through fiber splicing. The fabricated MZI is then incorporated into a laser cavity. The laser cavity adopts a hybrid cavity mode-locking method that combined nonlinear polarization rotation (NPR) and few-layer black phosphorus (BP). Second, the ultrafine fiber is extracted from the standard single-mode fiber (SMF) via the flame brush technique, the tapered fiber is knotted, and the fabricated micro-knot resonator (MKR) is obtained. The fabricated MKR is then incorporated into the laser cavity. The laser cavity is mode-locked using a real saturable absorber.

Results and Discussions Based on the MZI multi-wavelength mode-locked fiber laser, when the pump power reaches 270 mW, a multi-wavelength continuous laser output is generated (Fig. 4). To obtain different pulse states, we increase the pump power to 327 mW and adjust the polarization controller (PC) to realize single-wavelength locking (the central wavelength is adjustable) (Fig. 5). The NPR suppresses mode competition and introduces the filtering effect. The modulation depth of the sample MZI is large; thus, multi-wavelength mode-locked laser sequences are realized at room temperature. A dual-wavelength mode-locked laser is obtained by increasing the power to 400 mW (Fig. 6). Three-wavelength mode-locked lasers with different distance intervals are obtained by further increasing the power to 420 mW (Fig. 7). The interval between two adjacent wavelengths is an integer multiple of the free spectral range. By further increasing the power to 440 mW, four-wavelength mode-locked laser is obtained (Fig. 7).

In the passive harmonic mode-locked fiber laser based on MKR, by increasing the pump power to 60 mW, we observe bound-state mode-locking, accompanied by a gradual accumulation of nonlinearity in the cavity (Fig. 9). Under the same pump power, in the absence of MKR, the pulse shape output by the laser cavity is observed to be a typical soliton pulse (Fig. 10). In a numerical simulation, researchers found that the addition of a narrow-band filter to the resonator limits the pulse bandwidth, the filtering effect leads to pulse splitting, and the splitting threshold of the soliton can be further reduced to generate more pulses. Under the combined action of dispersion, nonlinear effects, filter effects, and other factors in the passive mode-locked fiber laser cavity, multiple pulses are obtained and transmitted back and forth in the resonator simultaneously. Each pulse is evenly distributed at equal intervals. The phases between the pulses are matched, thus achieving passive harmonic mode-locking. The fundamental repetition frequency of the laser cavity is 8.6 MHz. When the pump power is increased to 100 mW, the 8th-order harmonic mode-locking is generated. By increasing the power and adjusting the PC, the 24th-order harmonic mode-locking is obtained. The fundamental repetition frequency in this case is 206.4 MHz (Fig. 11).

A theoretical model to further study the effects of the filter on the laser is established. The propagation path of the pulse in the resonator cavity is simulated, and the influence of various devices in the cavity on the pulse is considered. The pulse circulated in the cavity for one circle is used as the input signal for the next cycle until the pulsed light field reaches a stable self-consistent state. An evident modulation phenomenon is observed in the spectrum (Fig. 12), and stable double pulses can be observed in the time domain. In this case, the formation of multiple pulses is mainly a result of the spectral filtering effect.

Conclusions Filtering effects have a significant impact on pulse formation, waveform regulation, and dynamic transmission. In this study, a multifunctional thulium-doped fiber laser with an all-fiber MZI as a compact comb filter is demonstrated to achieve a multi-wavelength continuous wave (CW) laser output and multi-wavelength mode-locked laser pulse output. A single-wavelength mode-locked laser in the spectral range can be used to tune the output and simultaneously realize four-wavelength mode-locked pulses. An all-fiber MKR is fabricated using the tapering technique. Bound solitons are obtained in the cavity of an erbium-doped fiber laser, and the mode-locked state is realized by switching from the fundamental frequency state to harmonic mode-locking. By adjusting the power and polarization state in the resonator, the 24th-order harmonic mode-locking is achieved. The pulse shape is still bound-state soliton. The experimental results and numerical analysis reveal that the filtering effect has a significant influence on the pulse shape.

Key words lasers; mode-locked lasers; multi-wavelength mode-locked lasers; filtering effect; comb filter; bound state soliton