

# 超快拉曼光纤激光器技术研究进展

潘伟巍<sup>1,3</sup>, 周佳琦<sup>1</sup>, 张磊<sup>2</sup>, 冯衍<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率光纤激光技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>上海频准激光科技有限公司, 上海 201800;

<sup>3</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 锁模和超短脉冲同步抽运是拉曼光纤激光器得到超短脉冲的主要方式。在锁模拉曼光纤激光器中, 基于等效可饱和吸收体的结构可以实现较高性能的输出, 但目前仍面临增益光纤过长带来的问题。超短脉冲同步抽运的方式可以有效解决这一问题, 实现参数极佳的超快拉曼激光输出。超快拉曼光纤激光器发展潜力巨大, 未来的研究将着眼于进一步提升各类超快拉曼光纤激光器的整体输出性能并探究其中的新现象。

**关键词** 非线性光学; 拉曼光纤激光器; 超快激光; 锁模; 同步抽运

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0508016

## Research Advances in Ultrafast Raman Fiber Lasers

Pan Weiwei<sup>1,3</sup>, Zhou Jiaqi<sup>1</sup>, Zhang Lei<sup>2</sup>, Feng Yan<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of High Power Fiber Laser Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>PreciLasers Co., Ltd., Shanghai 201800, China;

<sup>3</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Mode-locking and ultrashort pulse synchronous pumping are the main ways to obtain ultrashort pulses from Raman fiber lasers. In the mode-locked Raman fiber lasers, high performance output can be achieved in the structure with equivalent saturable absorbers, but the limitation caused by the long gain fiber remains. The method of synchronous pumping can overcome this problem effectively and achieve excellent ultrafast Raman laser output. There is a great potential for the ultrafast Raman fiber laser technology, and future research will focus on further improving the overall performance of various ultrafast Raman fiber lasers and investigating new phenomena observed in these laser systems.

**Key words** nonlinear optics; Raman fiber laser; ultrafast laser; mode locking; synchronous pumping

**OCIS codes** 190.5650; 320.7090; 140.3510; 140.3550

## 1 引言

超快激光由于其脉冲宽度窄、峰值功率高、光谱宽度大等优点而具有极高的研究意义和应用价值, 从被发明以来一直都是激光技术研究的热点<sup>[1-6]</sup>。近些年来, 超快光纤激光器因为其结构紧凑、光束质量好、转化效率高等优点以及在系统散热、装置成本等方面展现出的巨大潜力已引起人们的极大兴趣<sup>[7-11]</sup>。同时, 由于光纤中处处存在非线性与色散

且灵活可控, 超快光纤激光器已成为研究各种超短脉冲成型机制和超快现象的平台<sup>[12-16]</sup>。

通常在超快光纤激光器中采用稀土掺杂光纤作为增益介质, 但由于稀土离子的能级间隔固定且能级宽度有限, 所以只能在分立的光谱范围内实现激光输出。但一些特殊应用领域, 例如生物医疗和基础科研<sup>[17-18]</sup>, 对超快激光器的输出波长有着特殊的要求, 此时利用稀土离子作为增益介质的常规超快光纤激光器因为其增益带宽的限制很难满足相应需

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-02-01; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61575210, 61805262)、中国博士后科学基金面上项目(2018M630474)

\* E-mail: feng@siom.ac.cn

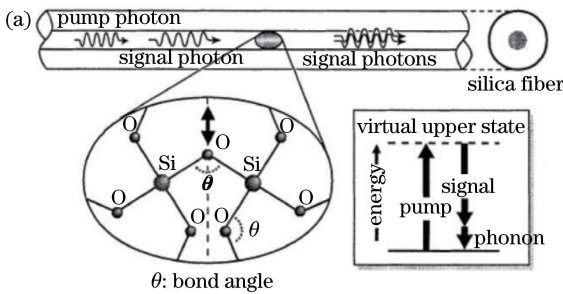
求。作为一种特殊的增益方式,光纤中的拉曼散射效应具有波长灵活这一优点,只要有合适波长的抽运激光,即可产生光纤透明范围内任意波长的激光输出<sup>[19-22]</sup>。所以如果在超快光纤激光器中采用拉曼增益,可以有效突破输出光谱范围的限制,实现波长灵活的超快激光输出。

目前拉曼光纤激光器在高功率和特殊波长输出等领域已经取得了众多成就<sup>[23-28]</sup>,作为光纤激光器领域的重要组成部分,超快光纤激光器在拉曼增益下的表现同样值得关注。拉曼增益的众多特点也会给超短脉冲的产生带来影响,有些成为优点,有些则会带来负面影响,而在采用不同方式获得拉曼超快激光时,这些优缺点还会互相转换。本文综述了超快拉曼光纤激光器技术的研究进展。介绍了拉曼效应的基本原理和特点;介绍用锁模技术在拉曼光纤激光器中得到超快激光输出的基本原理与方法、研究进展和存在的问题;介绍用超短脉冲同步抽运的方式在拉曼光纤激光器中得到超快激光输出的优势、基本原理和研究进展;介绍基于随机分布反馈的脉冲抽运超快拉曼光纤激光器;最后对超快拉曼光纤激光器技术的发展进行了总结与展望。

## 2 锁模拉曼光纤激光器

### 2.1 基本原理与方法

拉曼散射是一种非线性效应,在任何分子介质



中均可发生,会将一部分光从一个光场转移到另一个频率下移的光场中,频移的大小取决于介质的振动模式。拉曼散射过程可用量子力学描述,即一个光子被介质分子散射成另一个低频光子,同时分子完成两个振动态之间的跃迁,如图 1(a)所示。图 1(b)所示为抽运光与斯托克斯光同偏振(实线)和垂直偏振(虚线)时常规石英光纤的归一化拉曼增益系数与频移的变化。从图中可以看出,当抽运光与斯托克斯光的偏振态相同时,拉曼增益较高;而当抽运光与斯托克斯光垂直偏振时拉曼增益较小。当抽运光与斯托克斯光有相同偏振态时,石英光纤中的拉曼增益谱有很宽的频率范围(高达 40 THz),并且在 13 THz 附近存在较宽的峰值,即具有较宽的增益谱,这是由石英玻璃的非晶体特性导致的。13 THz 增益峰值频移与常见的激光频率相比是一个较小的值,所以拉曼光纤激光器有很高的量子效率,对于工作在 1  $\mu\text{m}$  波段的基于石英光纤的拉曼激光器,当激光运转在拉曼峰值频移处时,其量子效率可以高达 95%。而且受益于非线性效应的特性,光纤中的拉曼效应还具有极高的响应速度,响应时间在飞秒量级。同时,与稀土增益不同,拉曼增益随抽运光强度增长而增大,无饱和效应。另外,与稀土增益类似,光纤中的拉曼效应同样存在受激散射现象,即表现出阈值特性,当抽运光强度超过一定值时,转换效率会迅速提升,此时拉曼斯托克斯光强度近似指数增长。

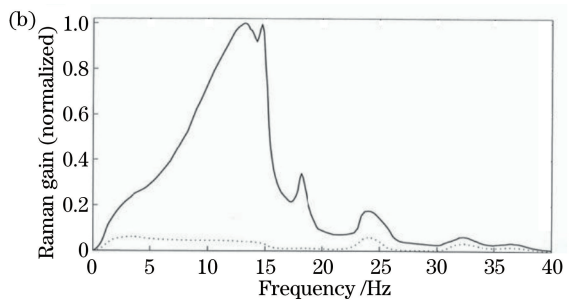


图 1 光纤中的拉曼效应<sup>[23]</sup>。(a)基本原理;(b)抽运光和斯托克斯光同偏振(实线)和垂直偏振(虚线)时,石英光纤的归一化拉曼增益谱

Fig. 1 Raman effect in fiber<sup>[23]</sup>. (a) Basic principle; (b) normalized spectra of Raman gain in quartz fiber when pump light and Stokes light are parallel polarized (solid line) and orthogonally polarized (dashed line)

与常规的稀土增益超快光纤激光器相同,超快拉曼激光可以通过锁模的方式得到。所谓锁模,就是采用在激光谐振腔内引入周期性调制的方法来锁定激光不同模式之间的相位差,从而使得各个模式相互干涉,并实现周期性的相干相长,最终得到超短脉冲序列输出<sup>[29]</sup>。根据所引入的调制方式不同,锁模可分为主动锁模和被动锁模。主动锁模是在腔内

插入电光或声光调制器,并设置调制频率与谐振腔长度相匹配,从而锁定纵模间的相位差,同时使得腔内始终只有一部分光可以起振,压窄激光脉冲的宽度。在主动锁模拉曼光纤激光器研究中,由于功率原因大多采用声光调制器<sup>[30-31]</sup>,目前已经实现了百皮秒量级的超短脉冲输出,与被动锁模结合后还可将输出脉冲压窄到数十皮秒<sup>[31]</sup>。但在光纤激光器

中采用主动锁模的最大问题在于在插入主动调制器的同时还需要配置相应的驱动和信号发生器等设备,导致激光器的体积增大,结构变得复杂。另外,作为一种最常用的锁模方式,被动锁模则是采用在谐振腔内加入可饱和吸收体的方式来自动引入调制频率与谐振腔长度相匹配的周期性调制,并利用其入射功率越高,透过率越高的饱和吸收特性来压窄脉冲宽度,从而实现超短脉冲输出。这种方式无需外置设备,很大程度上保持了光纤激光器结构紧凑、灵活小巧的优势。一般根据可饱和吸收体类型不同可分为真实可饱和吸收体和等效可饱和吸收体;真实可饱和吸收体就是利用材料的吸收特性来实现谐振腔内的周期性调制和激光脉宽的压窄,常见的有半导体可饱和吸收镜(SESAM)、碳纳米管和石墨烯等;等效可饱和吸收体则是有效利用了光纤中的非线性折射率,使得不同的光强积累不同的非线性相移,再通过干涉或检偏等方式实现透过率随光强增大而增大的等效可饱和吸收体效果,常见的有非线性偏振旋转(NPR)、非线性光学环形镜等。

目前各类锁模机制在拉曼光纤激光器中的表现已被广泛研究。其中基于 SESAM、碳纳米管和石墨烯等常见真实可饱和吸收体的锁模拉曼光纤激光器都有报道<sup>[32-36]</sup>。但与相应的稀土掺杂锁模光纤激光器相比,这类锁模拉曼光纤激光器目前普遍输出性能不佳,存在输出脉冲序列稳定性较差、频谱信噪比较低等问题。我们认为这与拉曼增益是一种响应速度极快的非线性过程有关。响应时间快于常见的真实可饱和吸收体的恢复时间,因此,在连续光抽运下会导致可饱和吸收体处于恢复期时有实时拉曼效应发生,自发拉曼光产生并被放大从而产生超短脉冲以外的拉曼光分量,严重影响了锁模脉冲的稳定性。等效可饱和吸收体同样基于光纤非线性,与拉曼增益有类似的响应速度。因此等效可饱和吸收体在锁模拉曼光纤激光器中能有效抑制谐振腔内自发拉曼光和连续光分量产生,保证只有纯净的超短脉冲在谐振腔内振荡,从而能够实现性能较好的超快拉曼激光输出。由于拉曼过程响应速度快,抽运激光的时域特性会直接传递给拉曼激光。通常作为抽运源的常规光纤激光器的输出时域噪声较大,不可避免地使锁模拉曼激光输出噪声也很大。

## 2.2 非线性偏振旋转锁模拉曼光纤激光器

非线性偏振旋转是光纤激光器中最常见的等效可饱和吸收体,这种技术利用了光纤中的非线性折射率和双折射效应,使得脉冲中不同强度的部分在

激光腔内传播时积累不同的相移,从而演化成不同的偏振态,进而由检偏器件进行偏振选择,引入周期性调制,并对应于时域上可以形成脉冲的窄化效应,等效为可饱和吸收体的作用。

目前基于非线性偏振旋转的锁模拉曼光纤激光器已有较多报道<sup>[37-40]</sup>,其中在 2015 年, Kuang 等<sup>[38]</sup>成功获得基于非线性偏振旋转锁模的超快拉曼光纤激光器,激光器以多模连续激光作为抽运源,其装置结构如图 2(a)所示,其中 WDM 为波分复用器,EDF 为掺铒光纤,EDFA 为掺铒光纤放大器,CW 为连续波,HNLF 为高非线性光纤,PC 为偏振控制器,PDI 为偏振依赖隔离器。两个偏振控制器和快轴截止的保偏隔离器为非线性偏振旋转锁模的典型结构,增益光纤为 500 m 长的高非线性光纤,得到的超快拉曼激光中心波长为 1651.3 nm,脉冲宽度为 890 ps,脉冲重复频率为 378.35 kHz。输出脉冲的时域包络和脉冲序列分别如图 2(b)和 2(c)所示。

同年,Liu 等<sup>[39]</sup>报道了可实现皮秒超短脉冲和纳秒短脉冲输出的锁模拉曼光纤激光器,同样采用了非线性偏振旋转机制,其装置结构如图 3(a)所示,其中 RFL 为拉曼光纤激光器,OC 为输出耦合器,PD-ISO 为偏振依赖隔离器。所用的增益光纤为 710 m 长的高非线性光纤。通过调节偏振控制器的不同状态,激光器可以工作在皮秒超短脉冲和纳秒短脉冲输出的状态,脉冲宽度分别为 180 ps 和 500 ns,两种状态下的脉冲序列和时域包络分别如图 3(b)和 3(c)所示。图 3(d)和 3(e)则分别为两种状态下的光谱与频谱,两种状态下输出脉冲的重复频率均为 275 kHz,频谱信噪比达到了 65 dB。

大部分被报道的非线性偏振旋转锁模拉曼光纤激光器都工作在 1.5  $\mu\text{m}$  或 1.6  $\mu\text{m}$  等负色散波段,而对工作在其他波段的锁模拉曼光纤激光器的探究同样非常有意义。2017 年,本课题组研究得到了工作在 1120 nm 的非线性偏振旋转锁模拉曼光纤激光器<sup>[40]</sup>。在研究中,为了提升输出脉冲序列的稳定性,我们创新性地采用了时域稳定性较好的自发辐射放大(ASE)光源作为抽运源,有效利用了拉曼增益响应速度快的特性,通过提供稳定增益的方式来提升输出拉曼超短脉冲的稳定性。同时我们还利用光谱滤波引入了耗散机制,实现了拉曼增益下的耗散孤子锁模,进一步提升了输出脉冲的稳定性。激光器结构如图 4(a)所示,其中 PM980 为一种商用保偏单模光纤,45°熔接的 PM980 保偏光纤与隔离

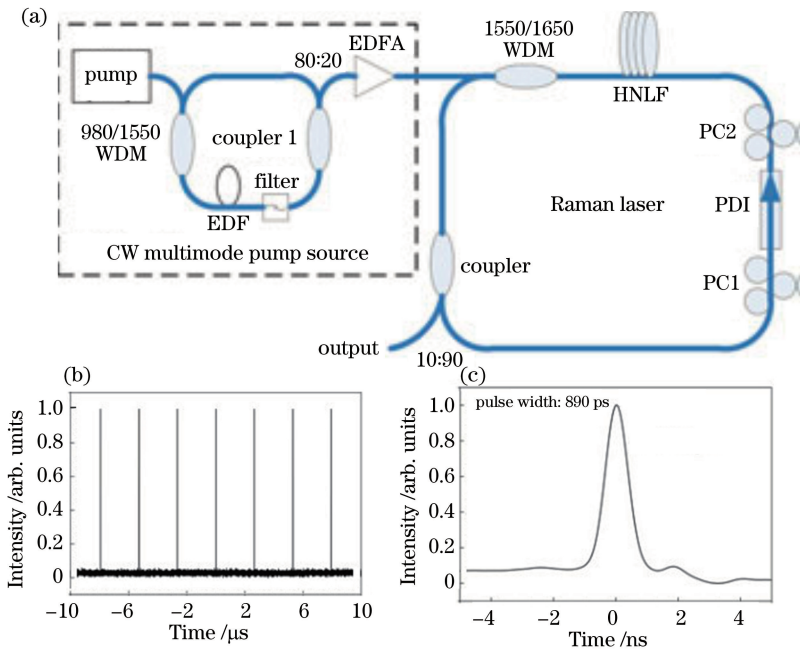


图 2 多模连续激光抽运的 NPR 锁模拉曼光纤激光器<sup>[38]</sup>。(a)结构示意图;(b)脉冲序列;(c)输出拉曼激光的时域包络

Fig. 2 NPR mode-locked Raman fiber laser pumped by continuous multimode laser<sup>[38]</sup>. (a) Schematic of structure; (b) pulse train; (c) temporal envelop of output Raman laser

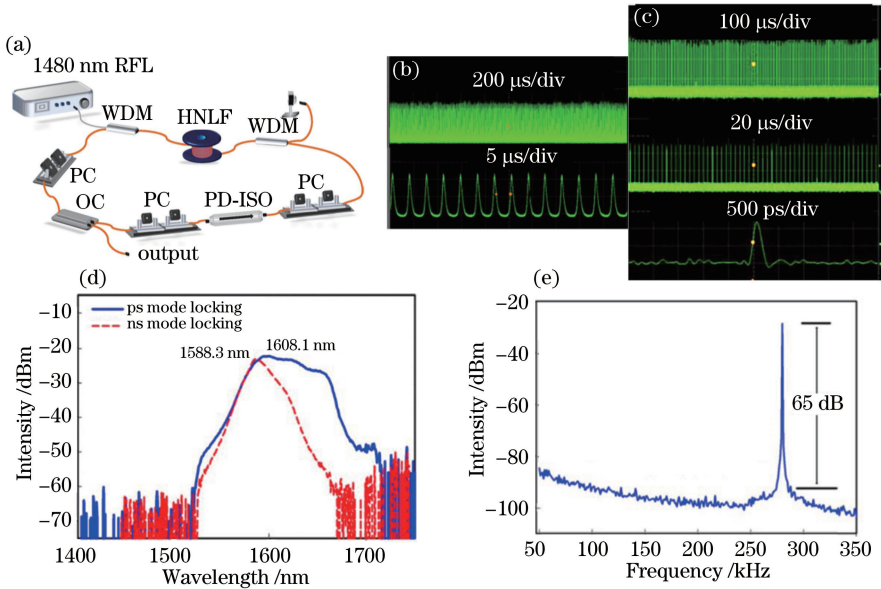


图 3 输出脉宽可切换的 NPR 锁模拉曼光纤激光器<sup>[39]</sup>。(a)结构示意图;(b)纳秒脉冲输出时的脉冲序列;

(c)皮秒脉冲输出时的脉冲序列和时域包络;(d)两个状态下的输出光谱;(e)输出脉冲的基频频谱

Fig. 3 Pulse width switchable mode-locked Raman fiber laser based on NPR<sup>[39]</sup>. (a) Structure schematic; (b) pulse train of nanosecond pulse output; (c) pulse train and temporal envelop of picosecond pulse output; (d) output spectra of two states; (e) spectrum of output pulses around fundamental repetition rate

器组成了波长灵活的 Lyot 滤波器,所用的增益光纤为 70 m 长拉曼光纤,其拉曼增益约为普通单模光纤拉曼增益的 5 倍。最终输出的拉曼耗散孤子脉冲重复频率为 2.47 MHz,光谱如图 4(b)所示,为两边陡峭的典型耗散孤子光谱。图 4(c)所示为

输出脉冲的基频频谱,其信噪比达到了 85 dB,证明输出的拉曼脉冲具有极高的时域稳定性。经腔外脉宽压缩后,脉冲宽度达到了 1.05 ps,其自相关迹如图 4(d)所示,受限于实验条件,脉宽并未被压到变换极限。

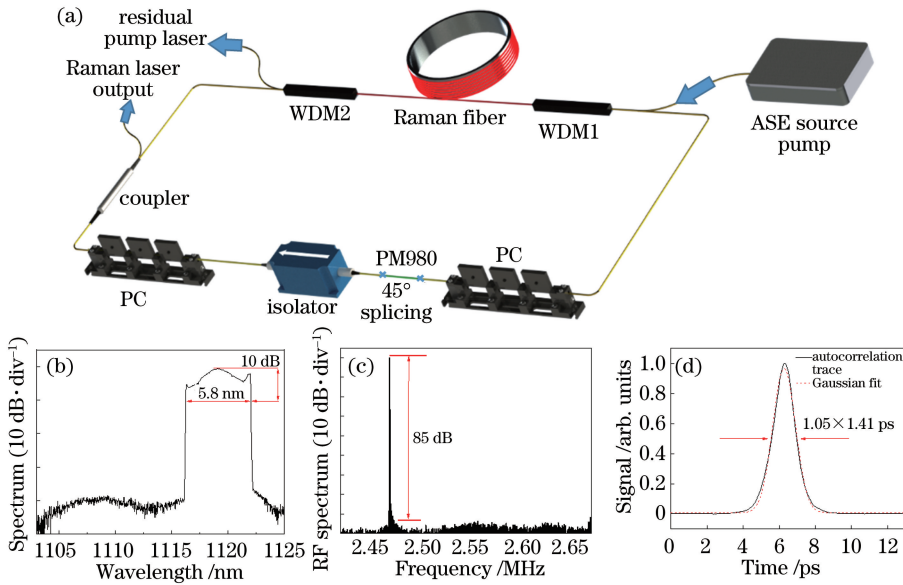


图 4 NPR 拉曼耗散孤子光纤激光器<sup>[40]</sup>。(a)结构示意图;(b)输出光谱;(c)脉冲基频频谱;(d)压缩后的自相关迹

Fig. 4 Raman dissipative soliton fiber laser with NPR<sup>[40]</sup>. (a) Schematic of structure; (b) output spectrum; (c) spectrum of pulses around fundamental repetition rate; (d) autocorrelation trace after compression

### 2.3 非线性光学环形镜旋转锁模拉曼光纤激光器

非线性光学环形镜(NOLM)锁模也是一种在光纤激光器中常用的锁模技术<sup>[41]</sup>,同样利用了光纤的非线性折射率。当脉冲进入环内时会分为顺时针和逆时针两路并积累非线性相移,两路光在输出时相遇并发生干涉,由于脉冲中不同强度的部分积累不同的非线性相移,这使得脉冲在环形镜中具有强度相关的透射特性,可以像饱和吸收体一样引入周期性调制并窄化脉冲。相比于非线性偏振旋转锁模,非线性光学环形镜锁模的优势在于更容易在全保偏结构下实现。使用非线性环形镜进行锁模的光纤激光器,根据其腔的形状一般可分为8字形激光器和9字形激光器,其中在拉曼光纤激光器中被研究的都是8字形激光器。

2005年,Chestnut等<sup>[42]</sup>对波长灵活的非线性环形镜锁模拉曼光纤激光器进行了探究,图5(a)为该拉曼激光器工作在1.57 μm的结构示意图,其中DSF为色散位移光纤。拉曼增益光纤为2.1 km长的色散位移光纤,通过变换不同的抽运波长和带通滤波器,成功获得了波长为1.57,1.33,1.41 μm的超快拉曼激光输出,对应的脉冲宽度分别为440,500,860 fs,它们的自相关迹分别如图5(b)~(d)所示。

2010年,Aguergaray等<sup>[43]</sup>同样通过非线性环形镜锁模获得了超快拉曼光纤激光器。激光器结构如图6(a)所示,其中DCF为色散补偿光纤,ISO为

隔离器,BPF为带通滤波器,NOLM为非线性光学环形镜,SMF为单模光纤。实验中采用两段长度分别为1.4 km和1 km的色散位移光纤作为拉曼增益光纤,抽运光源则采用输出波长为1435 nm的连续拉曼激光器。通过理论计算和巧妙的腔设计,首次实现自相似锁模拉曼激光输出。输出脉冲中心波长为1534 nm,脉冲宽度为450 ps,重复频率为64 kHz,因为自相似脉冲为线性啁啾,经过腔外12.8 km单模光纤的压缩,最终获得了脉宽为7 ps的拉曼超短脉冲输出。输出脉冲的光谱和时域包络分别如图6(b)和6(c)所示,脉冲光谱和时域波形均为抛物线形,为典型自相似脉冲特征。

前文已经提及,非线性光学环形镜锁模的最大优势在于可在全保偏结构下实现,但在上述工作中,研究者并未在全保偏拉曼光纤激光器中实现非线性光学环形镜锁模。最近,本课题组探究了全保偏结构下的非线性光学环形镜锁模拉曼光纤激光器,同样采用了ASE源作为抽运源并结合Lyot滤波器引入的耗散机制来提升输出拉曼超短脉冲的稳定性。激光器装置如图7(a)所示,所用的增益光纤为80 m长的保偏拉曼光纤,激光器结构为典型8字形。通过优化环形镜光纤长度以实现最佳调制效果,最终我们首次在全保偏锁模光纤激光器中得到拉曼耗散孤子脉冲输出,激光器同样工作在1120 nm。输出脉冲的光谱如图7(b)所示,为典型耗散孤子光谱,脉冲的重复频率为1.23 MHz。图7(c)为腔内直接

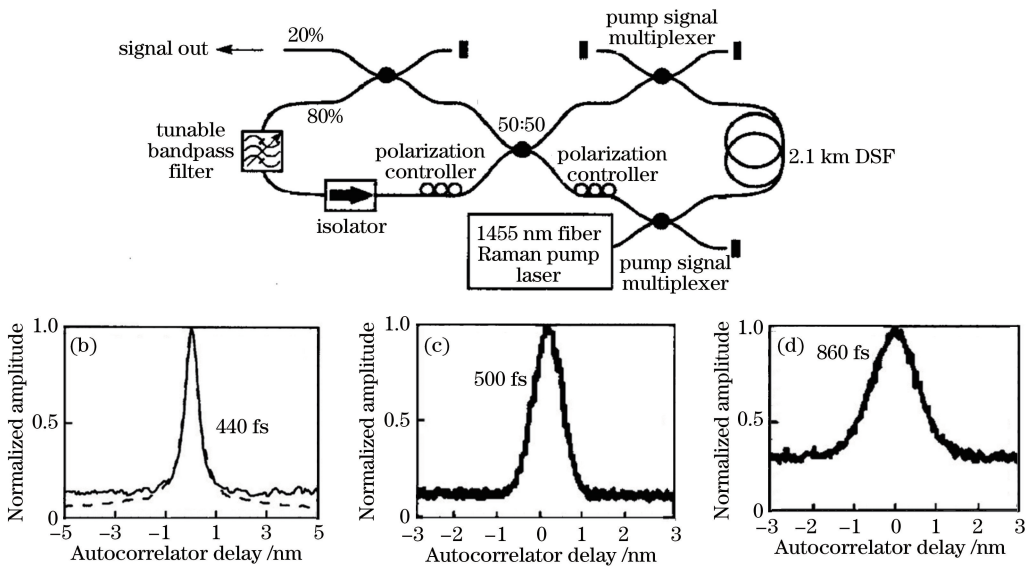


图 5 波长灵活的 8 字腔锁模拉曼光纤激光器<sup>[42]</sup>。(a) 1.57 μm 的 8 字腔锁模拉曼光纤激光器结构示意图；(b) 1.57 μm 拉曼超短脉冲自相关迹；(c) 1.41 μm 拉曼超短脉冲自相关迹；(d) 1.33 μm 拉曼超短脉冲自相关迹  
Fig. 5 Wavelength-versatile Raman figure-8 fiber laser<sup>[42]</sup>. (a) Structural schematic of 1.57 μm Raman figure-8 laser; (b) autocorrelation trace of 1.57 μm Raman ultrashort pulse; (c) autocorrelation trace of 1.41 μm Raman ultrashort pulse; (d) autocorrelation trace of 1.33 μm Raman ultrashort pulse

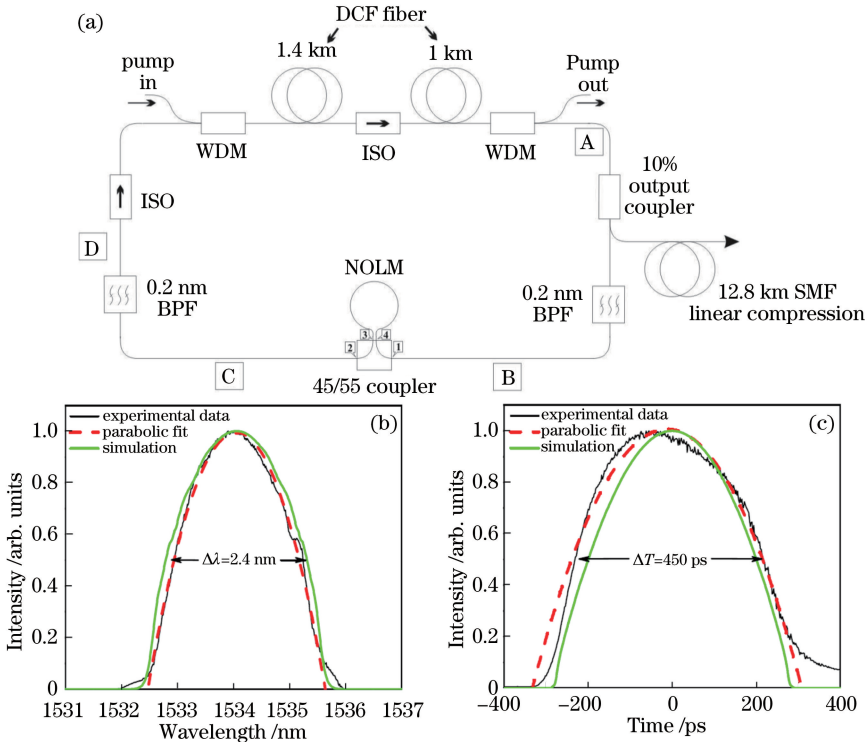


图 6 基于 NOLM 的自相似锁模拉曼光纤激光器<sup>[43]</sup>。(a) 结构示意图；(b) 实验和模拟中得到的拉曼自相似脉冲光谱；(c) 实验和模拟中得到的拉曼自相似脉冲时域包络

Fig. 6 Self-similar mode-locked Raman fiber laser with NOLM<sup>[43]</sup>. (a) Structure schematic; (b) Raman self-similar pulse spectrum obtained by experiment and simulation; (c) Raman self-similar pulse temporal shape obtained by experiment and simulation  
输出的拉曼脉冲自相关迹,经高斯拟合后脉冲宽度 其信噪比同样高达 85 dB,体现了 ASE 源抽运和耗散机制的优越性。  
约为 68.9 ps。输出脉冲的基频频谱如图 7(d)所示,

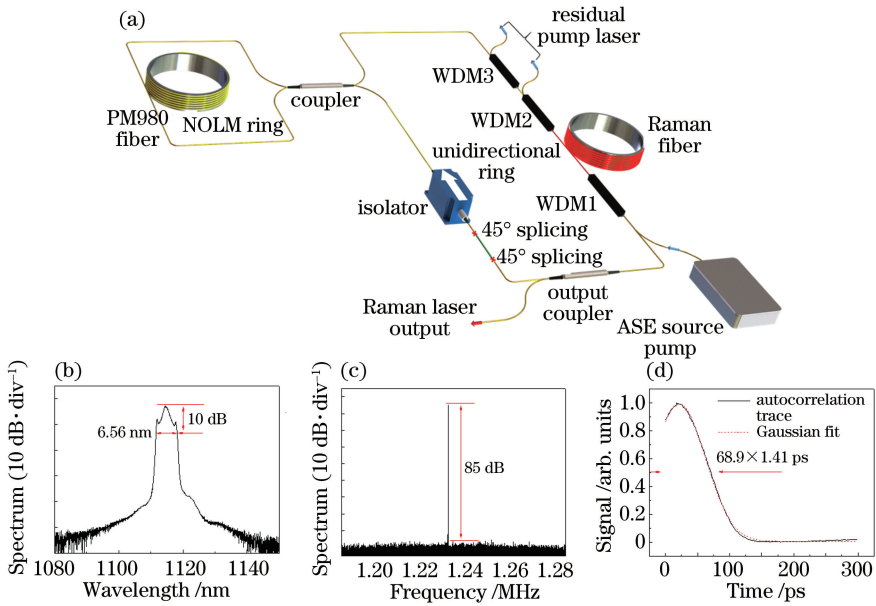


图 7 NOLM 锁模的全保偏拉曼耗散孤子光纤激光器。(a)结构示意图;(b)输出光谱;(c)基频频谱;(d)自相关迹  
Fig. 7 All-polarization maintaining Raman laser system mode locked by NOLM. (a) Schematic of structure;  
(b) output spectrum; (c) spectrum around fundamental repetition rate; (d) autocorrelation trace

目前关于锁模拉曼光纤激光器的研究已经非常全面,各种锁模方式与脉冲成型机制在拉曼光纤激光器中的表现都有研究。但仍有一些问题存在,主要是连续光抽运下光纤中单位长度内拉曼增益较小,往往需要较长的增益光纤提供足够的增益以克服损耗实现谐振,而在一般的锁模激光器中,可饱和吸收体也会引入较大的损耗。所以在常规的锁模拉曼光纤激光器中,一般在数瓦的抽运光下只能实现平均功率为数毫瓦的拉曼超短脉冲输出,整体效率非常低。同时较长的增益光纤还大大增加了拉曼谐振腔的长度,限制了输出脉冲重复频率的提升,即使使用特制的拉曼光纤来提供更大的拉曼增益,输出的基频脉冲重复频率也很难大于 2.5 MHz,从而限制了激光器应用范围。较长的腔长还增加了腔内色散与非线性相移的积累,使得腔内脉冲传输不稳定,容易分裂,只能在较小的抽运功率区间内实现稳定的基频脉冲输出,且直接输出脉冲宽较大,需要腔外压缩才能满足应用需求。另外,拉曼增益响应速度极快的特点虽然有利于获得重复频率极高的脉冲,但受限于增益光纤长度的影响,这一优势很难发挥出来。而且响应快这个特点会使抽运光的时域特性传递给拉曼光,时域稳定性较差的抽运光会导致输出拉曼脉冲的稳定性也很差,所以想要在锁模拉曼光纤激光器中得到稳定的超短脉冲序列输出,还对抽运光的时域稳定性有极高的要求。

### 3 同步抽运拉曼光纤激光器

#### 3.1 基本原理

利用超短脉冲同步抽运拉曼光纤激光器是实现波长灵活的拉曼脉冲激光的另外一种方法。在拉曼光纤激光器中,受利于光纤中拉曼散射响应速度极快的特点,可以有效地将抽运脉冲的时域特性传递给拉曼脉冲,在无需可饱和吸收体的情况下实现拉曼超短脉冲输出。在脉冲抽运下仅在抽运脉冲宽度的时间段内提供增益,所以也不会有自发拉曼光和连续光分量在腔内生成,可以和等效可饱和吸收体一样保证拉曼脉冲的纯净性。同时,拉曼增益与抽运功率成正比且不会饱和的优点,使得超短脉冲抽运可以利用其极高的峰值功率在单位长度的光纤中提供较高的拉曼增益,从而有效克服锁模拉曼激光器中所需增益光纤较长的缺点,可以在短腔情况下实现高效率的能量转换,并使输出拉曼超短脉冲的重复频率大大提高,输出性能提升。另外,由于受激拉曼散射存在阈值特性,即只有瞬时功率大于一定值的抽运脉冲部分才能实时转换为拉曼脉冲,所以在优化腔内光纤长度和色散特性时,采用同步抽运技术还可直接获得比抽运脉冲宽度更窄的拉曼脉冲输出,与只能直接输出较宽脉冲的锁模拉曼光纤激光器相比这是很大的提升。

在同步抽运机制中,由于抽运光为脉冲形式,为了实现谐振增强,需要一个最关键的匹配,即拉曼谐

振腔长度与抽运脉冲重复频率的匹配。只有实现这一匹配,腔内产生的拉曼脉冲在谐振腔内每传输一圈才可以与抽运脉冲重合获得增益并压窄脉宽。这个匹配可以是拉曼脉冲在腔内传输一圈的时间与抽运脉冲的脉冲间隔相同,即腔内只有一个拉曼脉冲起振的基频情况,也可以是拉曼脉冲在腔内传输一圈的时间是抽运脉冲的脉冲间隔的整数倍,即腔内同时有多个拉曼脉冲起振的谐波状态。

关于超短脉冲抽运下的同步抽运拉曼光纤激光器的研究早在 20 世纪 70 年代已经开始。1977 年, Stolen 等<sup>[44]</sup>首次报道了同步抽运拉曼光纤激光器,采用锁模激光器作为抽运源并利用色散实现了波长调谐。另外在 20 世纪七八十年代, Lin 等<sup>[45-48]</sup>也分别从理论和实验角度研究了同步抽运拉曼光纤激光器。近些年,随着超快激光技术和光纤技术的迅速发展与对特殊波段超快光源的需求日益增长,同步抽运拉曼光纤激光器再次成为研究热点,目前已经有大量的研究工作把同步抽运技术应用在拉曼光纤激光技术中产生超快拉曼激光。

### 3.2 同步抽运拉曼光纤激光器研究进展

在同步抽运拉曼光纤激光器的研究中,关于拉曼谐振腔长度与抽运脉冲重复频率的匹配这一关键问题,已有众多匹配方式得到了研究,主要包括: 1)在空间光路中通过旋转或移动光栅等器件的方式来调整谐振腔长度以匹配抽运脉冲重复频率<sup>[49]</sup>; 2)在抽运激光器谐振腔或拉曼谐振腔内加入延迟线器件从而灵活调节抽运脉冲重复频率或拉曼谐振腔长度以实现匹配<sup>[50-51]</sup>; 3)采用增益调制激光二极管作为抽运源,利用其输出脉冲重复频率可灵活调节的特点实现匹配<sup>[52]</sup>; 4)对抽运脉冲时域进行展宽使得抽运脉冲与拉曼脉冲重合的时间宽度增大从而降低匹配难度<sup>[53]</sup>。针对拉曼增益波长灵活这一优点,为在同步抽运拉曼光纤激光器中实现特殊波长输出,使用掺磷光纤等特殊掺杂的拉曼增益光纤探究特殊波长下基于超短脉冲同步抽运的超快拉曼激光产生,也是一个研究方向<sup>[53-54]</sup>。目前已有部分关于同步抽运拉曼光纤激光器的研究取得了非常好的结果。

2014 年, Babin 等<sup>[50]</sup>在同步抽运拉曼光纤激光器中获得了拉曼耗散孤子脉冲输出,其激光器结构如图 8(a)所示,其中 PBS 为偏振分束器, LD 为激光二极管, DS 为耗散孤子, RDS 为拉曼耗散孤子。抽运脉冲与拉曼脉冲共享一个谐振腔,首先在谐振腔内通过非线性偏振旋转锁模得到 1030 nm 的高能量耗散孤子脉冲并以其作为抽运源,利用其在腔

内传输产生拉曼耗散孤子脉冲,两种脉冲的重复频率均为 5 MHz。谐振腔内有一部分是拉曼脉冲与抽运脉冲分开传输的,在拉曼脉冲传输的一路中加入延迟线以补偿色散带来的脉冲延迟,从而实现拉曼脉冲与抽运脉冲的匹配。激光器中还分别有抽运脉冲和拉曼脉冲各自的输出端,以便在研究过程中分别对脉冲特性进行研究。另外,研究者还通过数值模拟对该过程进行深入研究。实验和模拟中得到的耗散孤子抽运脉冲和拉曼耗散孤子脉冲光谱分别如图 8(b)和 8(c)所示,无论实验还是模拟,输出脉冲的光谱均有典型的耗散孤子特征,模拟还探究了拉曼光无反馈时的输出光谱特性。图 8(d)所示为腔内直接输出的抽运脉冲和拉曼脉冲的自相关迹,经自相关迹宽度可推得两种脉冲的实际宽度均在 30 ps 左右,其中拉曼脉冲的宽度略小于抽运脉冲。图 8(e)所示为模拟中腔内隔离器之后、WDM1 之前的 B 点测得的脉冲时域包络与脉冲内瞬时频率(啁啾)情况。由于 1  $\mu\text{m}$  附近为正色散波段,所以波长较大的拉曼脉冲传输超前于抽运脉冲。脉冲内瞬时频率情况体现了抽运脉冲与拉曼脉冲内均为线性啁啾,这也是耗散孤子脉冲的典型特征。

2015 年, Churin 等<sup>[51]</sup>报道了一台高性能同步抽运拉曼光纤激光器,同样实现了拉曼耗散孤子脉冲输出,其装置结构如图 9(a)所示,其中 SESAM 为半导体可饱和吸收镜, FBG 为光纤布拉格光栅, Preamp 为预放大器, Amp 为放大器。抽运源为一台主振荡功率放大(MOPA)结构的 1030 nm 掺镱超快激光装置,种子源为 SESAM 锁模的线性腔超快光纤激光器,腔内插入一个延迟线以调整抽运脉冲重复频率来匹配拉曼谐振腔的长度。抽运源输出的超短脉冲重复频率为 43 MHz,脉冲宽度为 4 ps。拉曼谐振腔为一个简单环形腔,利用 WDM 的透射谱作为滤波器来引入耗散机制。实验中,拉曼脉冲在不同能量下输出的光谱如图 9(b)所示,输出的拉曼脉冲光谱都为典型耗散孤子光谱,另外图 9(b)还展示了激光器工作在类噪声状态时的输出光谱。图 9(c)和 9(d)所示为拉曼脉冲在各个状态下从腔内直接输出与经腔外光栅对压缩去啁啾后的自相关迹。腔内直接输出的脉冲宽度大于抽运脉冲,这是由拉曼脉冲在腔内传输时积累的色散展宽导致。经腔外压缩后,脉冲宽度小于 150 fs,达到了变换极限。输出脉冲能量为 18 nJ 时,整体光光转换效率达到了惊人的 88%,充分体现了同步抽运拉曼光纤激光器的优势。这个激光器成功实现了同步抽运拉



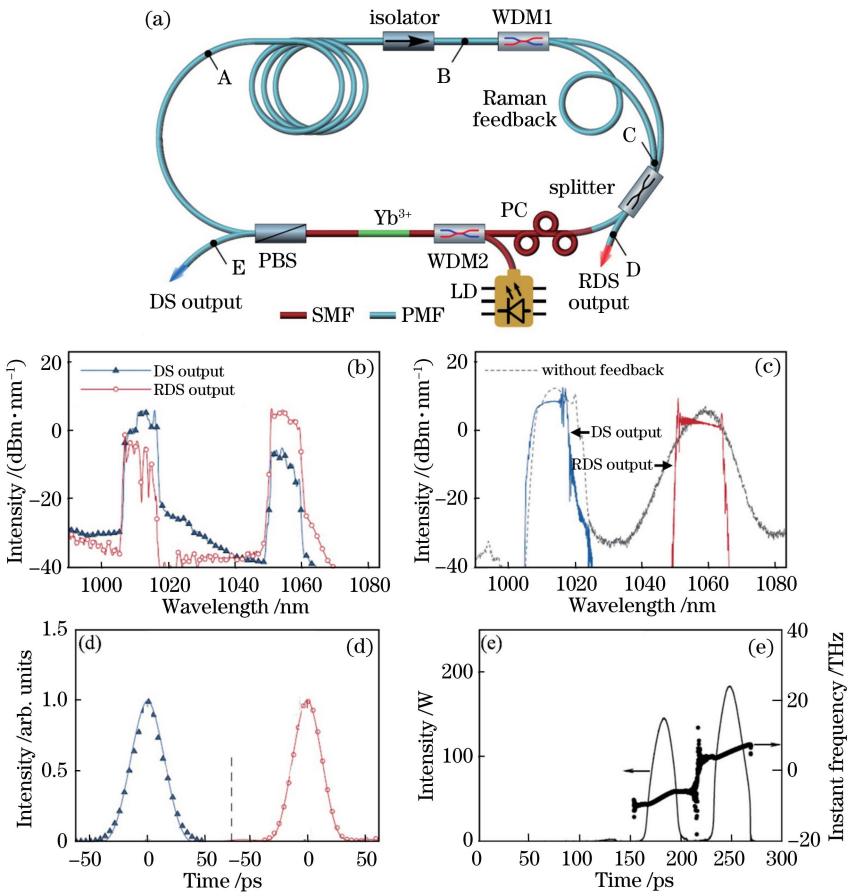


图 8 共享腔的超快光纤激光器<sup>[50]</sup>。(a)结构示意图;(b)实验测得的耗散孤子抽运脉冲光谱(三角形)和拉曼耗散孤子脉冲光谱(圆形);(c)数值模拟得到的耗散孤子抽运脉冲光谱和拉曼耗散孤子脉冲光谱以及拉曼光无反馈时的输出光谱;(d)实验测得的耗散孤子抽运脉冲自相关迹(三角形)和拉曼耗散孤子脉冲自相关迹(圆形);(e)数值模拟得到的耗散孤子抽运脉冲时域包络(左)和拉曼耗散孤子脉冲时域包络(右)以及各自瞬时频率情况

Fig. 8 Cavity shared ultrafast fiber laser<sup>[50]</sup>. (a) Schematic of structure; (b) measured spectra of the dissipative soliton (triangle) and Raman dissipative soliton (circle) in experiment; (c) calculated spectra of dissipative soliton, Raman dissipative soliton and Raman light without feedback; (d) measured autocorrelation traces of dissipative soliton (triangle) and Raman dissipative soliton (circle) in experiment; (e) calculated temporal shapes of dissipative soliton (left) and Raman dissipative soliton (right), and their instant frequencies

曼光纤激光器的高性能输出,在 88% 的光光转换效率下得到了重复频率 43 MHz、脉冲能量大于 15 nJ、脉宽小于 150 fs 的超快拉曼激光输出,性能参数达到了普通稀土增益的超快光纤激光器的主流水平,可有效满足众多应用需求。

上述两项工作都是利用延迟线来实现抽运脉冲与拉曼脉冲的匹配。另外还有一种巧妙的方式可以实现这一匹配,即采用基于增益调制激光二极管的 MOPA 光纤激光器作为抽运源。这种抽运光源可通过调节输入的电脉冲信号重复频率来实现输出激光脉冲重复频率的灵活调节,从而实现与拉曼脉冲的匹配,这类匹配方式同样可实现高性能超快拉曼激光输出。2015 年,Chen 等<sup>[52]</sup>报道了基于增益调

制抽运源的同步抽运拉曼光纤激光器,其装置结构如图 10(a)所示,其中 DFB-LD 为分布反馈式激光二极管,GS 为增益开关,LR-FBG 为低反光纤布拉格光栅,HR-FBG 为高反光纤布拉格光栅,PD 为光电二极管,OSA 为光谱分析仪,RSA 为频谱分析仪。基于增益调制的激光二极管输出的种子光经两级放大后作为抽运光,抽运一个由高低反光栅组成的线形拉曼谐振腔,抽运脉冲的脉宽在 100 ps 左右。基频输出的拉曼脉冲时域包络如图 10(b)所示,脉冲宽度为 78 ps。图 10(c)所示为对应的频谱和脉冲序列。由于抽运脉冲重复频率可通过信号发生器控制,所以可以轻易实现百兆赫兹左右的抽运脉冲输出,使用常规的锁模光纤激光器作为抽运源

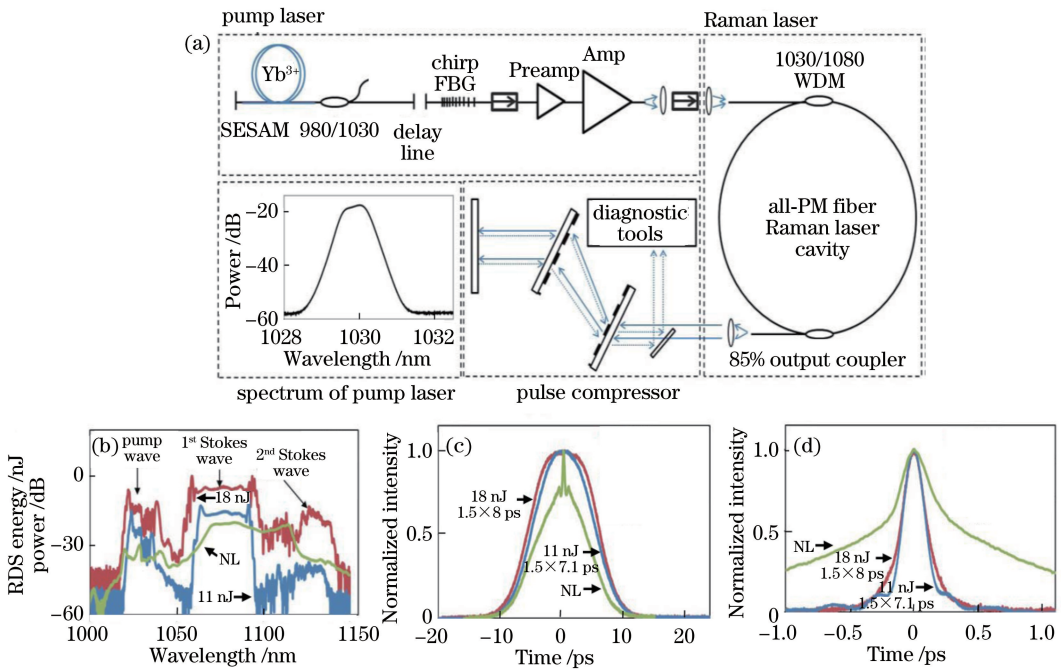


图9 高性能同步抽运拉曼耗散孤子光纤激光器<sup>[51]</sup>。(a)拉曼光纤激光器及其抽运光结构示意图；(b)脉冲能量为11 nJ和18 nJ时输出的相干拉曼脉冲光谱及类噪声状态时的输出光谱；(c)腔内直接输出的相干拉曼脉冲及类噪声状态时的自相关迹；(d)腔外压缩后的相干拉曼脉冲及类噪声状态时的自相关迹

Fig. 9 High performance synchronously pumped Raman dissipative soliton fiber laser<sup>[51]</sup>. (a) Schematic of Raman fiber laser and pump laser; (b) output spectra of coherent Raman pulses at energies of 11 nJ and 18 nJ and noise-like pulses; (c) autocorrelation traces of coherent and noise-like Raman pulses at output of Raman laser; (d) autocorrelation traces of coherent and noise-like Raman pulses after external compression

时很难达到这一性能。在实验中，研究者最高获得了重复频率为 99.28 MHz 的八阶谐波拉曼超短脉冲输出，大大提高了同步抽运拉曼光纤激光器的应用价值。二阶拉曼脉冲(重复频率 24.82 MHz)和八阶拉曼脉冲的频谱与脉冲序列分别如图 10(d)和 10(f)所示。另外，受益于紧凑的全光纤结构，这台同步抽运拉曼光纤激光器从抽运光到拉曼光的光光效率达到 80%，充分体现了同步抽运的优势。

同步抽运拉曼光纤激光器已被证明可输出不亚于稀土增益超快光纤激光器的超快拉曼激光，所以进一步探究特殊波长下的超快拉曼激光产生也很有意义。普通石英光纤中的波长拓展可通过改变抽运光波长或级联拉曼产生的方式实现，在拉曼光纤激光器中另一个实现波长拓展的方式则是采用特殊掺杂的拉曼增益光纤，利用不同介质中特殊的拉曼增益谱得到新波长的拉曼激光输出。其中掺磷拉曼光纤使用较多，其拉曼增益峰值位于频移约 40 THz 处，即用 1064 nm 的抽运光可通过一阶拉曼转换得到 1246 nm 的拉曼光输出。最近，Kharenko 等<sup>[54]</sup> 研究报道了基于掺磷光纤的同步抽运拉曼耗散孤子光纤激光器，其结构如图 11(a)所示，其中 HCDS

FL 为高啁啾耗散孤子光纤激光器，PC 为抽运合束器，VDL 为可调延迟线，DC 为双包层，PM 为保偏。抽运源为 1064 nm 的耗散孤子光纤激光器，抽运脉冲进入拉曼谐振腔之前经过了一段光纤以展宽脉冲，以便研究不同抽运脉宽下的拉曼脉冲特性；拉曼腔内插入一个延迟线实现腔长与抽运脉冲重复频率的匹配；另外研究者还尝试了不同分光比的输出耦合器以实现输出拉曼耗散孤子脉冲的最佳化。最终测得抽运脉宽为 50 ps，谐振腔输出比例为 1% 时可实现最佳拉曼耗散孤子脉冲输出，输出脉冲在不同能量时的光谱如图 11(b)所示，均有耗散孤子特征。图 11(c)所示为腔内直接输出的超快拉曼激光的自相关迹，经换算后得到脉宽约为 72 ps。

### 3.3 基于随机分步反馈的超短脉冲抽运拉曼光纤激光器

目前同步抽运拉曼光纤激光器已经可以实现性能极佳的特殊波段超快激光输出，但这种机制存在一个问题，即长时间运行时光纤的长度和折射率会随着环境温度、湿度等参数的变化而变化，导致抽运脉冲重复频率与拉曼谐振腔长度的匹配变差甚至失配，输出脉冲性能下降。如果要长期实现精确匹配，

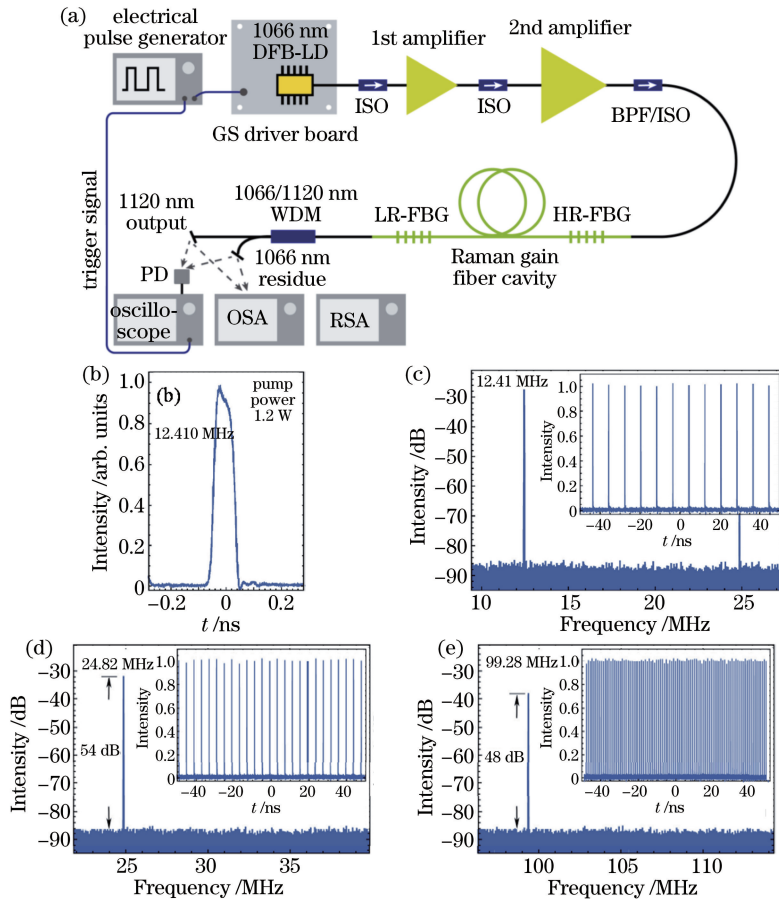


图 10 基于增益调制抽运源的同步抽运拉曼光纤激光器<sup>[52]</sup>。(a)结构示意图;(b)基频拉曼脉冲时域包络;(c)基频拉曼脉冲频谱(插图:基频拉曼脉冲时域序列);(d)二阶拉曼脉冲频谱(插图:二阶拉曼脉冲时域序列);(e)八阶拉曼脉冲频谱(插图:八阶拉曼脉冲时域序列)

Fig. 10 Synchronously pumped Raman fiber laser based on gain modulated pump<sup>[52]</sup>. (a) Schematic of structure; (b) spectrum and temporal trace (inset) of fundamental Raman pulses; (c) spectrum and temporal trace (inset) of 2<sup>nd</sup>-order Raman pulses; (d) radio frequency spectrum and temporal trace (inset) of 8<sup>th</sup>-order Raman pulses

需要一个反馈控制回路对抽运重复频率或拉曼腔长进行实时控制,但这会与主动锁模激光器一样大大增加激光系统的体积和复杂程度,使其丧失光纤激光器轻便小巧、结构紧凑的优势。

针对这个问题,本课题组提出一种创新的匹配方法,即将基于光纤中瑞利散射的随机分布式反馈引入脉冲抽运拉曼光纤激光器中,在谐振腔内让拉曼脉冲进入一段长光纤中,长光纤中的瑞利散射会在光纤的任意位置发生并提供随机分布式反馈,拉曼脉冲光纤各个位置产生的反馈脉冲则会汇聚成连续光的形式进入增益光纤中,再由抽运脉冲自动选择合适位置的反馈光进行放大,从而实现抽运脉冲重复频率与拉曼谐振腔长度的自匹配<sup>[55]</sup>。这一过程的基本原理如图 12(a)所示,其中 DFB 为分布反馈。实验采用掺镱皮秒激光系统作为抽运源,其脉冲重复频率为 28.4 MHz,拉曼激光器则采用环形腔

结构,用一段 20 km 长的单模光纤提供随机分布式反馈并通过环形器引入腔内,具体的实验装置如图 12(b)所示,其中 WDM 为波分复用器。在环形器后插入一对光纤跳线并用法兰盘相连,当光纤跳线断开时,可测量随机分布反馈光特性并研究单程的自发拉曼产生及放大过程。最终成功得到了重复频率同样为 28.4 MHz 的拉曼超短脉冲输出。输出脉冲的自相关迹为基底带尖的形式[图 12(c)],说明得到的拉曼超短脉冲本质上为由大量杂乱子脉冲组成的类噪声脉冲<sup>[56]</sup>。但是在自相关迹中,基底的归一化高度始终大于 0.5 且随抽运功率增大而增大[图 12(d)],这说明该拉曼脉冲具有部分相干性且相干性随抽运功率增大而提升<sup>[57]</sup>。另外,我们研究了随机分布反馈光特性,测得其反馈效率为  $2.2 \times 10^{-4}$ ,反馈光的时域和频谱分别如图 12(e)和 12(f)所示,其时域表现为连续光形式但频谱中仍包含了

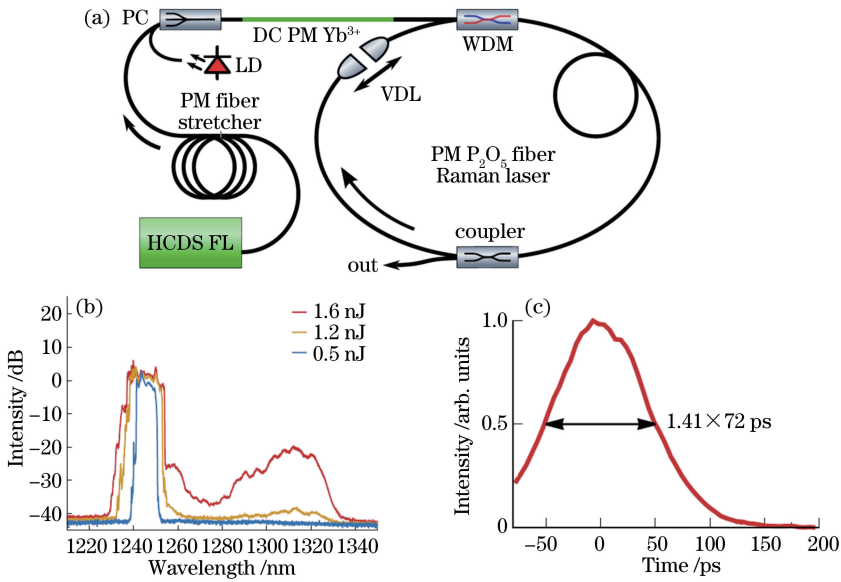


图 11 基于磷光纤维的 1.3  $\mu\text{m}$  同步抽运拉曼耗散孤子光纤激光器<sup>[54]</sup>。(a)结构示意图；(b)不同脉冲能量时的拉曼脉冲光谱；(c)未压缩的拉曼脉冲自相关迹

Fig. 11 1.3  $\mu\text{m}$  synchronously pumped Raman dissipative soliton fiber laser with phosphosilicate fiber<sup>[54]</sup>. (a) Schematic of structure; (b) output spectra of Raman pulses; (c) autocorrelation trace of Raman pulses without compression

重复频率信息。基于如此低的反馈效率，该反馈光在这个机制中是否发挥作用？在进一步的研究中，将随机拉曼脉冲与单程拉曼光产生及放大的拉曼 ASE 进行了详细的对比。最终通过斜效率[图 12 (g)]、光谱宽度[图 12(h)]等对比发现随机拉曼过程具有明显的振荡特征，即随机激光输出时在阈值附近斜效率迅速提升且光谱变窄更加明显。另外还对比了这两种输出的频谱和相对强度噪声，发现随机激光输出具有更高的频谱信噪比和更低的强度噪声，证明了随机分布反馈的作用。

## 4 结束语

由于波长灵活，基于拉曼增益的超快光纤激光器一直具有很高的研究价值和应用价值。目前锁模和超短脉冲同步抽运是拉曼光纤激光器中实现超快激光输出的主要方式。关于锁模拉曼光纤激光器的研究中，包括主动锁模和采用各类真实可饱和吸收体与等效可饱和吸收体的被动锁模等多种锁模方式，以及各种脉冲成型机制均已得到深入研究并取得较好的结果。但目前锁模拉曼光纤激光器最大的限制在于较长的增益光纤限制了输出脉冲的重复频率并积累色散导致脉宽较大。未来可以通过优化拉曼增益谱的方式解决这个问题，优化方向主要是寻求新的材料使增益光纤能提供更高的单位长度拉曼增益。另外，受益于光纤中的拉曼效应，超短脉冲同

步抽运的拉曼光纤激光器可以有效克服锁模拉曼光纤激光器的缺点，实现高性能、高效率的超快激光输出。目前已经探究了不同拉曼腔长与抽运重复频率的匹配方式以及特殊波长下的高性能超快拉曼激光产生并取得很好的成果。但这种机制对抽运源要求较高，要实现长时间稳定运行需要较为复杂的系统结构，其未来的研究方向在于如何在保证脉冲性能的同时实现更简易的匹配，具体方式可以是寻求随机分布反馈效率更高的特殊光纤或使用宽谱的大啁啾光纤布拉格光栅。

各类光纤激光技术的发展和特殊波段超快激光光源需求的提升，将会有效推动超快拉曼光纤激光器技术的进一步发展。超快拉曼光纤激光器的发展目标在于实现与稀土增益的超快光纤激光器相当的输出性能以满足实际应用需求。此外，由于受激拉曼散射是一种非线性效应，而超快激光与各类非线性效应紧密相关，所以在超快拉曼激光产生过程中还能观察到各种有趣的新现象，在未来研究中对这些新现象的探究也是非常有意义的。

## 参 考 文 献

- [1] Krausz F, Fermann M E, Brabec T, *et al.* Femtosecond solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(10): 2097-2122.
- [2] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. Nature, 2003, 424(6950): 831-838.

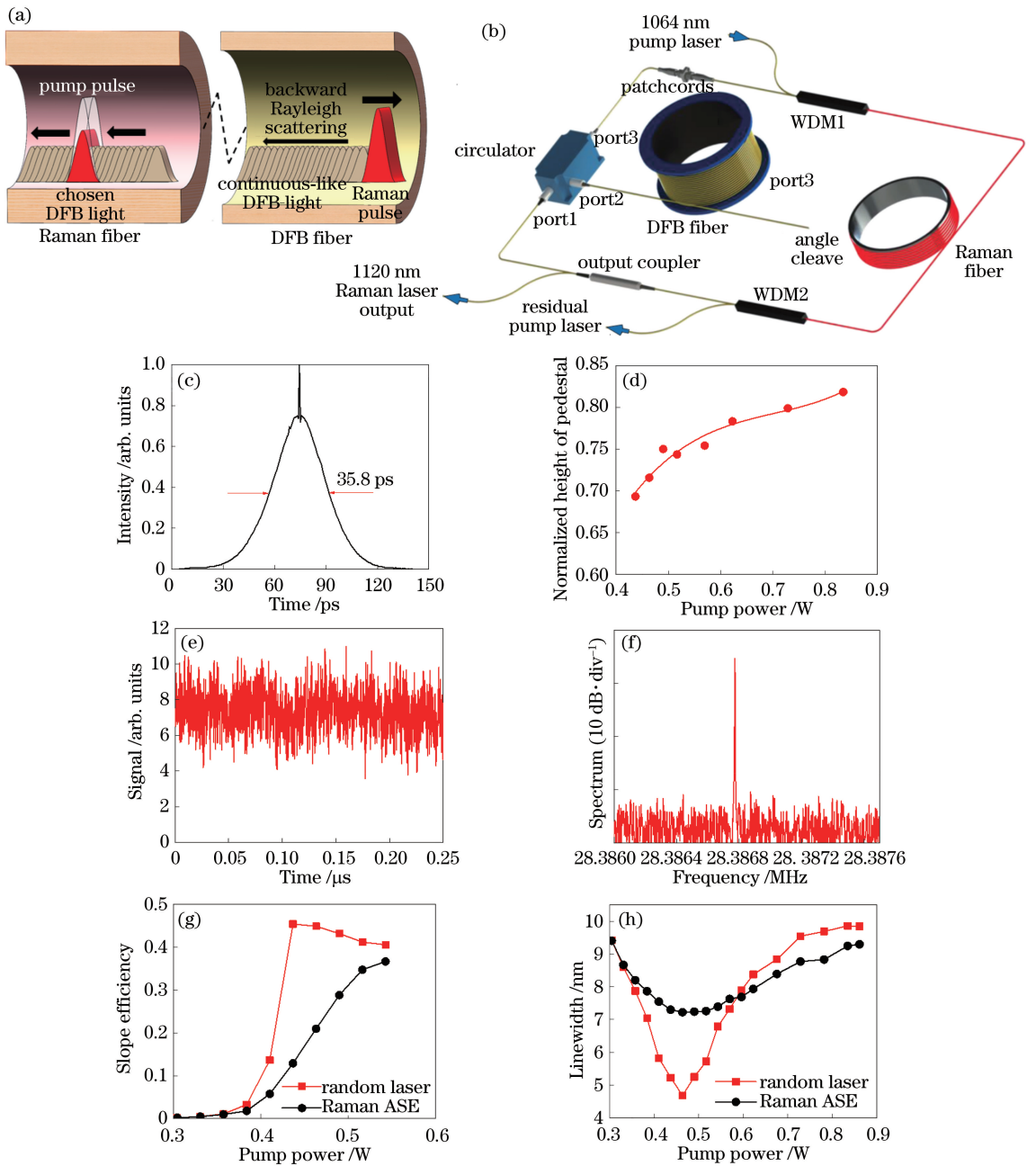


图 12 基于随机分布反馈的超短脉冲抽运拉曼光纤激光器<sup>[55]</sup>。(a)原理图;(b)激光器结构图;(c)输出的随机拉曼脉冲自相关迹;(d)随机拉曼脉冲自相关迹基底归一化高度与抽运功率的关系;(e)随机分布反馈光时域光谱;(f)随机分布反馈光频谱;(g)随机拉曼激光和拉曼 ASE 输出功率斜效率与抽运功率的关系;(h)随机拉曼激光和拉曼 ASE 输出光谱宽度与抽运功率的关系

Fig. 12 Ultrashort pulse pumped Raman fiber laser with random distributed feedback<sup>[55]</sup>. (a) Principle schematic; (b) configuration of the Raman laser; (c) autocorrelation trace of the Raman laser pulse; (d) normalized pedestal height of the autocorrelation trace as a function of pump power; (e) oscilloscope trace of the random distributed feedback light; (f) radio frequency spectrum of the random distributed feedback light; (g) comparison of the slope efficiency between the random laser output and the ASE; (h) comparison of the spectral bandwidth between the random laser output and the ASE

[3] Ell R, Morgner U, Kärtner F X, *et al.* Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser[J]. Optics Letters, 2001,

26(6): 373-375.

[4] Herink G, Jalali B, Ropers C, *et al.* Resolving the build-up of femtosecond mode-locking with single-

- shot spectroscopy at 90 MHz frame rate[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(5): 321-326.
- [5] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 219-225.
- [6] Kerse C, Kalaycioglu H, Elahi P, *et al.* Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [7] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [8] Kieu K, Renninger W H, Chong A, *et al.* Sub-100 fs pulses at watt-level powers from a dissipative-soliton fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 593-595.
- [9] Zhang L, Zhou J, Wang Z, *et al.* SESAM mode-locked, environmentally stable, and compact dissipative soliton fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(13): 1314-1316.
- [10] Zhou J, Pan W, Gu X, *et al.* Dissipative-soliton generation with nonlinear-polarization-evolution in a polarization maintaining fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4166-4171.
- [11] Kim J, Song Y. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(3): 465-540.
- [12] Oktem B, Ülgüdürcü C, Ilday F Ö. Soliton-similariton fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 307-311.
- [13] Grellu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [14] Chang W, Ankiewicz A, Soto-Crespo J M, *et al.* Dissipative soliton resonances[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(2): 023830.
- [15] Huang Y, Hu Z, Cui H, *et al.* Coexistence of harmonic soliton molecules and rectangular noise-like pulses in a figure-eight fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4056-4059.
- [16] Liu X, Yao X, Cui Y. Real-time observation of the buildup of soliton molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(2): 023905.
- [17] Dyball H. Yellow lasers hit the spot[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(8): 545.
- [18] Grosche G, Lipphardt B, Schnatz H. Optical frequency synthesis and measurement using fibre-based femtosecond lasers[J]. *The European Physical Journal D*, 2008, 48(1): 27-33.
- [19] Feng Y, Zhang L. *Raman fiber lasers*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 207.
- [20] Supradeepa V R, Feng Y, Nicholson J W. Raman fiber lasers[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(2): 023001.
- [21] Zhang L, Jiang H, Cui S, *et al.* Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 889-895.
- [22] Zhang L, Jiang H, Yang X, *et al.* Nearly-octave wavelength tuning of a continuous wave fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42611.
- [23] Bromage J. Raman amplification for fiber communications systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 79-93.
- [24] Feng Y, Jiang H W, Zhang L. Advances in high power Raman fiber laser technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201005. 冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201005.
- [25] Dong J, Zhang L, Zhou J, *et al.* 220 W Raman fiber laser at 1.24  $\mu\text{m}$  based on phosphosilicate fiber[J/OL]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018 [2018-12-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8579106>.
- [26] Turitsyn S K, Babin S A, El-Taher A E, *et al.* Random distributed feedback fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 231-235.
- [27] Huang L, Xu J, Ye J, *et al.* Power scaling of linearly polarized random fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0900608.
- [28] Tian C P, Wang Y Y, Shi H X, *et al.* Mid-infrared Raman laser source based on liquid-core fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 051405. 田翠萍, 汪滢莹, 师红星, 等. 基于液芯光纤的中红外拉曼激光光源[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 051405.
- [29] Weiner A. *Ultrafast optics*[M]. Hoboken: Wiley, 2009.
- [30] Yang X, Zhang L, Jiang H, *et al.* Actively mode-locked Raman fiber laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19831-19836.
- [31] Uznetsov A G K, Harenko D S K, Odivilov E V P, *et al.* Fifty-ps Raman fiber laser with hybrid active-passive mode locking[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 23872-23877.
- [32] Chamorovskiy A, Rautiainen J, Lytyikäinen J, *et al.* Raman fiber laser pumped by a semiconductor disk laser and mode locked by a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3529-3531.
- [33] Castellani C E S, Kelleher E J R, Travers J C, *et al.* Ultrafast Raman laser mode-locked by nanotubes[J].

- Optics Letters, 2011, 36(20): 3996-3998.
- [34] Castellani C E S, Kelleher E J R, Popa D, *et al.* CW-pumped short pulsed 1.12  $\mu\text{m}$  Raman laser using carbon nanotubes[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(1): 015101.
- [35] Zhang L, Wang G, Hu J, *et al.* Linearly polarized 1180-nm Raman fiber laser mode locked by graphene [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1809-1815.
- [36] Xu J, Wu S D, Liu J, *et al.* Noise-like pulsed Raman fiber lasers using graphene oxide saturable absorber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0302006.  
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 基于氧化石墨烯的类噪声脉冲拉曼光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302006.
- [37] Chamorovskiy A, Rantamäki A, Sirbu A, *et al.* 1.38- $\mu\text{m}$  mode-locked Raman fiber laser pumped by semiconductor disk laser[J]. Optics Express, 2010, 18(23): 23872-23877.
- [38] Zhan L, Kuang Q, Gu Z, *et al.* High-energy passively mode-locked Raman fiber laser pumped by a CW multimode laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(2): 391-395.
- [39] Liu J, Chen Y, Tang P, *et al.* Duration switchable high-energy passively mode-locked Raman fiber laser based on nonlinear polarization evolution [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1503207.
- [40] Pan W, Zhang L, Zhou J, *et al.* Raman dissipative soliton fiber laser pumped by an ASE source [J]. Optics Letters, 2017, 42(24): 5162-5165.
- [41] Doran N J, Wood D. Nonlinear-optical loop mirror [J]. Optics Letters, 1988, 13(1): 56-58.
- [42] Chestnut D A, Taylor J R. Wavelength-versatile subpicosecond pulsed lasers using Raman gain in figure-of-eight fiber geometries [J]. Optics Letters, 2005, 30(22): 2982-2984.
- [43] Aguegaray C, Méchin D, Kruglov V, *et al.* Experimental realization of a mode-locked parabolic Raman fiber oscillator[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 8680-8687.
- [44] Stolen R H, Lin C, Jain R K. A time-dispersion-tuned fiber Raman oscillator [J]. Applied Physics Letters, 1977, 30(7): 340-342.
- [45] Lin C, French W G. A near-infrared fiber Raman oscillator tunable from 1.07 to 1.32  $\mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 1979, 34(10): 666-668.
- [46] Nakazawa M, Kuznetsov M, Ippen E. Theory of the synchronously pumped fiber Raman laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(10): 1953-1966.
- [47] Smith K, Kean P N, Crust D W, *et al.* An experimental study of a synchronously pumped fibre Raman oscillator [J]. Journal of Modern Optics, 1987, 34(9): 1227-1233.
- [48] Golovchenko E A, Dianov E M, Mamyshev P V, *et al.* Theoretical and experimental study of synchronously pumped dispersion-compensated femtosecond fiber Raman lasers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990, 7(2): 172-181.
- [49] Lin D, Alam S, Teh P S, *et al.* Tunable synchronously-pumped fiber Raman laser in the visible and near-infrared exploiting MOPA-generated rectangular pump pulses [J]. Optics Letters, 2011, 36(11): 2050-2052.
- [50] Babin S A, Podivilov E V, Kharenko D S, *et al.* Multicolour nonlinearly bound chirped dissipative solitons [J]. Nature Communications, 2014, 5: 4653.
- [51] Churin D, Olson J, Norwood R A, *et al.* High-power synchronously pumped femtosecond Raman fiber laser [J]. Optics Letters, 2015, 40(11): 2529-2532.
- [52] Chen H, Chen S-P, Jiang Z-F, *et al.* All-fiberized synchronously pumped 1120 nm picosecond Raman laser with flexible output dynamics [J]. Optics Express, 2015, 23(18): 24088-24096.
- [53] Kobtsev S, Kukarin S, Kokhanovskiy A. Synchronously pumped picosecond all-fibre Raman laser based on phosphorus-doped silica fibre [J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18548-18553.
- [54] Kharenko D S, Efremov V D, Evmenova E A, *et al.* Generation of Raman dissipative solitons near 13 microns in a phosphosilicate-fiber cavity [J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15084-15089.
- [55] Pan W, Zhang L, Jiang H, *et al.* Ultrafast Raman fiber laser with random distributed feedback [J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(4): 1700326.
- [56] Horowitz M, Barad Y, Silberberg Y. Noiselike pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser [J]. Optics Letters, 1997, 22(11): 799-801.
- [57] Smirnov S, Kobtsev S. Modelling of noise-like pulses generated in fibre lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9732: 97320S.