

超长腔碳纳米管锁模多波长掺镜光纤激光器

王玉宝 齐晓辉 沈阳 姚繁蕾 徐志敬 潘玉寨

Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes

Wang Yu-Bao Qi Xiao-Hui Shen Yang Yao Yi-Lei Xu Zhi-Jing Pan Yu-Zhai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 204205 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.204205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

石墨烯被动锁模全正色散掺镜光纤激光器中的暗脉冲及其谐波

Dark pulses and harmonic mode locking in graphene-based passively mode-locked Yb³⁺-doped fiber laser with all-normal dispersion cavity

物理学报.2015, 64(19): 194205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194205>

基于 10 m 光子晶体光纤的放大自相似锁模振荡器研究

Amplifier similariton oscillator using 10 m photonic crystal fiber

物理学报.2015, 64(18): 184210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184210>

国产光纤实现直接抽运全光纤化 3000 W 级激光输出

3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber

物理学报.2015, 64(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164204>

高速线性光采样用被动锁模光纤激光器重复频率优化

Repetition rate optimization of passively mode-locked fiber laser for high-speed linear optical sampling

物理学报.2015, 64(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134206>

303MHz 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器

A 303 MHz fundamental repetition rate femtosecond Er: fiber ring laser

物理学报.2015, 64(11): 114210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114210>

超长腔碳纳米管锁模多波长掺镜光纤激光器*

王玉宝¹⁾ 齐晓辉²⁾ 沈阳¹⁾ 姚繁蕾¹⁾ 徐志敬¹⁾ 潘玉寨^{1)†}

1) (哈尔滨工业大学(威海)理学院, 威海 264209)

2) (哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院, 威海 264209)

(2015年4月16日收到; 2015年5月19日收到修改稿)

报道了一种超长腔碳纳米管锁模多波长掺镜光纤激光器, 光纤激光器的总长度为1021.2 m. 实验得到了噪声型孤子和孤子雨两种类型的多波长锁模脉冲, 重复频率均为199.8 kHz. 孤子雨具有更高的输出功率和单脉冲能量, 分别为40.3 mW和201.5 nJ, 对应的脉冲宽度为102.5 ns.

关键词: 锁模光纤激光器, 碳纳米管, 超长腔, 掺镜光纤

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Sf, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.64.204205

1 引言

低重复频率、高能量的脉冲光纤激光器具有光束质量高、可靠性高、效率高、结构紧凑、性价比高等优点^[1-3], 被广泛应用于眼外科手术、生物医学诊断、微机械加工等众多领域, 是目前的研究热点之一^[4,5]. 一种有效降低锁模光纤激光器重复频率的方法是通过延长腔内光纤长度、降低脉冲重复频率的同时单脉冲能量也随之提升, 并且保持了紧凑的腔体结构, 具有固体激光器无法比拟的优点^[6-8]. 采用各种锁模技术, 如半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[9,10]、非线性光纤环形镜(NOLM)^[11]、非线性偏振旋转效应(NPR)等^[12], 获得的超长腔锁模光纤激光器的重复频率在几百kHz, 单脉冲能量超过了百nJ. SESAM器件是目前商用广泛的被动锁模器件, 但是其抗损伤阈值低、生产成本低, 与光纤的耦合效率低, 不利于实现高能量脉冲激光输出. 采用NOLM和NPR锁模技术对信号偏振较为敏感, 且高功率下容易失去饱和吸收特性.

基于单壁碳纳米管的饱和吸收体(single-walled carbon nanotube saturable absorber, SWCNT-SA)具有宽的工作波长范围(700—2300 nm)、低饱和阈值功率、超快的恢复

时间(<800 fs)、偏振无关、稳定性好、制备工艺简单、生产成本低等优点, 已在各种锁模光纤激光器研究中得到广泛应用^[13-15]. 在超长腔锁模光纤激光器的研究中, Ismail等^[15]报道采用SWCNT作为锁模材料, 获得低于1 MHz的锁模掺镜光纤激光器, 但单脉冲能量只有0.34 nJ. Woodward等^[16]采用更长的光纤构成SWCNT锁模掺镜光纤激光器, 将重复频率进一步降低至641 kHz, 获得的单脉冲能量为0.2 nJ. 迄今未见采用SWCNT材料实现更高脉冲能量和更低重复频率的锁模掺镜光纤激光器的报道. 在上述研究方案中均采用了端帽耦合透射式结构, 其损伤阈值低, 无法实现高功率和高能量锁模. 采用光纤倏逝场耦合方式实现SWCNT锁模光纤激光器是一种提高损伤阈值、保持全光纤结构、提高输出功率和脉冲能量的研究方案, 引起了广泛的研究兴趣^[17,18]. 另外, 已报道的工作采用单包层掺杂光纤作为增益介质且腔长均在千米以下, 也是无法获得高脉冲能量和低重复频率锁模脉冲的原因之一.

本文采用双包层掺镜光纤作为增益介质, 将SWCNT沉积在飞秒激光制备的D型光纤上, 制备出光纤倏逝场耦合型SWCNT-SA, 用于实现自启动锁模. 并且在腔内加入普通单模光纤, 构成腔长

* 山东省自然科学基金(批准号: ZR2010FQ017)和哈工大科研创新基金(批准号: HIT. NSRIF. 2009146)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: panyzh2002@163.com

超过1 km的环形腔光纤激光器, 锁模脉冲的重复频率低至199.8 kHz. 实验获得了噪声型孤子和孤子雨两种类型的多波长锁模脉冲. 最高单脉冲能量达到了201.5 nJ, 对应脉冲宽度为102.5 ns.

2 可饱和吸收体的制备

本课题组采用飞秒激光刻写技术制备出D型光纤^[14,18,19], 再将碳纳米管沉积到D型光纤区域制备出SWCNT-SA. 制备过程如下: 取50 cm长的Corning SMF 28单模光纤, 用光纤钳在中间位置剥掉1 cm左右的涂覆层并固定在载玻片上, 光纤的两端分别接1064 nm光源和光功率计, 在飞秒激光微加工平台上刻出D型区, 同时实时监测光功率, 实验选取光功率降低到原来的40%停止刻蚀. 光纤D型区的侧面图和正面图如图1(a)所示, 刻蚀

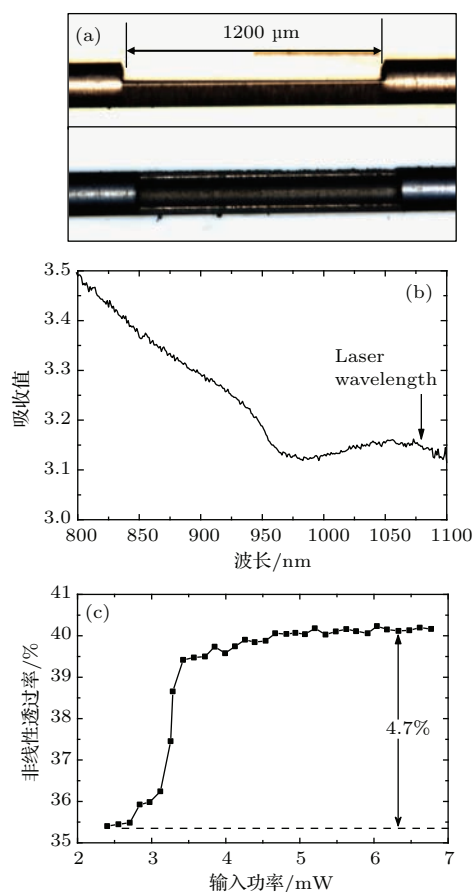


图1 SWCNT-SA的特性 (a) 光纤D型区侧视图(上)和俯视图(下); (b) SWCNT分散液的吸收光谱; (c) SWCNT-SA的透过率与输入功率的关系曲线

Fig. 1. Characteristics of SWCNT-SA: (a) Side-view (above) and top-view (below) of the D-shaped fiber; (b) absorption spectra of the dispersed SWCNT water solution; (c) the transmittance of SWCNT-SA with the input power.

长度为1200 μm , 深度为56 μm . 从图中可以看到光纤刻蚀表面比较光滑, 有效降低了散射带来的影响. 将1 ml 2 wt%的SWCNT分散液(纯度 > 95%, 管径 < 2 nm, 管长 < 5 μm) 稀释后, 经中低功率超声振荡10 h后, 得到0.2 wt%的SWCNT均匀分散液, 用分光光度计(Photolab6600UV-VIS)测试其光谱吸收特性, 如图1(b)所示, 可以看出0.2 wt%的SWCNT分散液在激光工作波段具有较大的吸收值. 将SWCNT分散液滴涂到光纤D型区后, 恒温烘干后得到光纤倏逝场型SWCNT-SA, 在2000倍光学显微镜下观察, 可以清楚地看到单壁碳纳米管沉积到D型光纤区域. 将重复频率为200 kHz、脉宽为纳秒量级的1064 nm光纤脉冲激光器与50/50输出耦合器连接, 其输出一端接SWCNT-SA后再接光功率计, 另一端直接光功率计, 得到SWCNT-SA的透过率与输入光功率的关系曲线, 如图1(c)所示. 由图可见, 随着输入功率的增加, 光纤倏逝场型SWCNT-SA表现出明显的非线性吸收特性, 非饱和损耗为57.8%, 可饱和损耗(即调制深度)约为4.7%.

3 锁模掺镜光纤激光器实验装置

基于D型光纤单壁碳纳米管饱和吸收体的超长腔锁模光纤激光器采用环形腔结构, 抽运源采用光纤耦合输出的915 nm多模半导体激光器, 最大输出功率为7 W, 通过抽运合束器耦合进入环形腔双包层掺镜光纤内, 构成反向抽运结构. 如图2所示, 环形腔包括10 m长的双包层掺镜光纤(型号为Nufern YDF-5/130, 主要参数为: 模场直径为6.3 μm , 在915 nm处包层抽运吸收率为0.6 dB/m, 内包层直径为130 μm , 纤芯数值孔径(NA)为0.13)、长度为1 km的长飞C1060单模光纤、分束比50/50的输出耦合器、SWCNT-SA、偏振无关隔离器和偏振控制器. 偏振无关隔离器用于保证腔内激光单向传输, 偏振控制器用于调整及控制腔内的激光偏振态, 环形腔总长度为1021.2 m. 掺镜光纤色散系数为-34 ps/nm/km@1060, 非线性系数为0.0048 W/m, C1060单模光纤色散系数为-38.6 ps/nm/km@1060, 非线性系数为0.0075 W/m. 可见该光纤激光器锁模脉冲工作在大正色散、高非线性条件下, 且腔内没有附加的窄带滤波器.

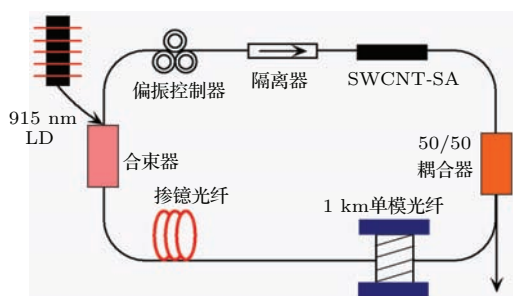


图2 (网刊彩色) 超长腔碳纳米管双包层掺镱光纤激光器实验装置图

Fig. 2. (color online) Schematic of the ultra-long cavity Yb-doped fiber laser mode-locked by CNT.

4 实验结果与分析

为便于同步测量输出特性, 将超长腔锁模掺镱光纤激光器的输出端连接一个分束比为90/10的输出耦合器, 10%的输出端连接高速光电探测器(带宽为3 GHz, 上升时间为130 ps), 光电探测器输出端连接带宽为12 GHz, 40 GSa/s的数字示波器(Agilent, infiniium DSO81204A), 90%的输出端再连接另一个分束比为50/50的输出耦合器, 分别接入光纤光谱仪(AQ6370B)和光功率计(LP-3A).

首先测试了环形腔内不接入光纤SWCNT-SA时光纤激光器的连续输出特性. 实验过程中, 无论怎样改变抽运功率和调节偏振控制器都没发现任何脉冲现象的存在, 证实了本实验制作的环形腔结构不存在其他锁模机理. 将SWCNT-SA接入环形腔, 如图2中所示位置. 当抽运功率为0.61 W时, 轻微调节偏振控制器, 得到了稳定的锁模脉冲, 说明基于D型光纤SWCNT-SA是环形腔内唯一的锁模器件. 继续增加抽运功率, 脉冲重复频率不变, 幅值增加, 直到抽运功率达到1.806 W时, 腔内无法维持多脉冲的模式锁定, 造成脉冲分裂. 当抽运功率1.49 W时, 测得的锁模脉冲序列如图3(a)所示, 锁模脉冲周期约为5.0 μs, 重复频率为199.8 kHz, 根据公式 $f = c/nL$ (其中, f 为光脉冲的重复频率, c 为光速, n 为纤芯折射率, L 为腔长) 计算可知, 与锁模光纤激光器的腔长相符合. 单脉冲如图3(b)所示, 锁模脉冲形状左右对称, 但脉冲包络是由大量的任意强度和相位分布的子脉冲组成, 且所有子脉冲均处于该脉冲内的锁定状态, 此锁模状态是一种典型的噪声型孤子锁模^[20-22], 脉冲宽度约为292.6 ns.

同一抽运功率下测得光谱如图4所示, 光谱分析仪分辨率为0.02 nm. 从图中可以看到脉冲

激光输出光谱为三个波长锁模, 主峰中心波长为1080.16 nm, 3 dB光谱谱宽为0.21 nm, 次峰中心波长为1074.18 nm, 最低峰中心波长为1086.56 nm, 次峰、最低峰波长光强度是主峰的9.87%和0.78%.

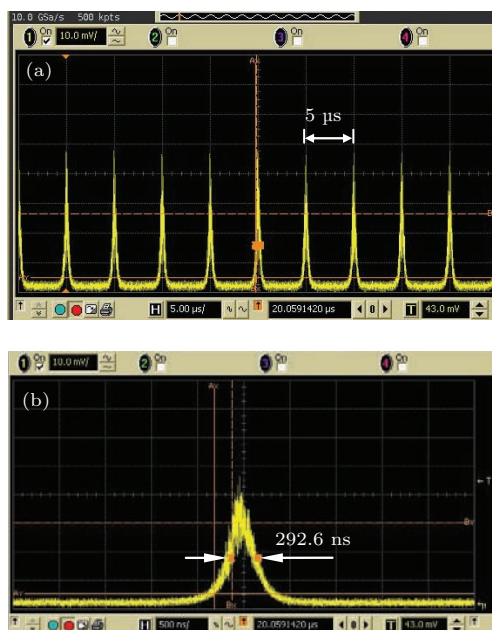


图3 (网刊彩色) 噪声型孤子锁模脉冲序列图和单脉冲图 (a) 脉冲序列; (b) 单脉冲

Fig. 3. (color online) Pulse train of the noise-like soliton: (a) Oscilloscope trace; (b) single pulse.

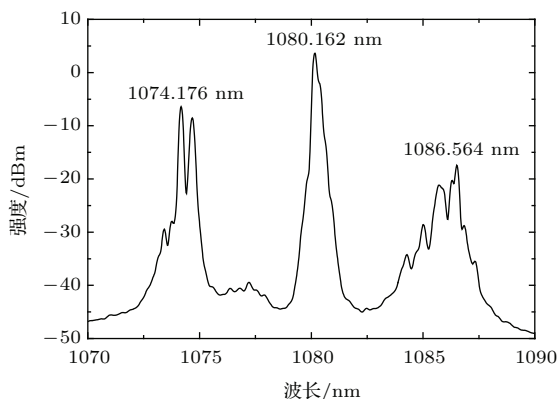


图4 噪声型孤子锁模输出光谱图

Fig. 4. Optical spectrum of the noise-like soliton.

在抽运功率为1.806 W时, 刚刚出现脉冲分裂现象, 此时仔细调整偏振控制器, 可以达到另一种稳定的脉冲状态, 每个重复周期内包含有噪声背景、漂移脉冲和凝聚相位孤子三个部分, 这种状态具有典型的孤子雨(soliton rain)形态特征^[23-25]. 漂移脉冲处于轻微抖动中, 表明腔内色散波与孤子脉冲间处于动态平衡状态, 漂移脉冲几乎占满整个周期, 并以恒定的速度从噪声中产生并移至凝聚孤

子相位, 漂移脉冲强度约为凝聚孤子相位主脉冲的10%. 凝聚孤子相位具有比噪声型孤子更高的脉冲能量, 且随着抽运功率的增加, 锁模脉冲维持该稳定状态, 抽运功率增大至一定值时, 脉冲再次分裂, 形成一种无序的多孤子脉冲状态, 表明腔内光功率过高, 积累的非线性效应产生锁模脉冲过度的非线性相移, 孤子相位无法保持凝聚状态^[25,26].

当抽运功率为1.929 W时, 测得的锁模脉冲序列如图5(a)所示. 脉冲幅值大小基本一致, 脉冲底部有许多小孤子脉冲, 锁模脉冲重复频率仍为基本孤子锁模重复频率, 约为199.8 kHz. 如图5(b)所示的单脉冲形态表明这种凝聚孤子相位实现了部分孤子脉冲的锁模, 与图3(b)相比, 凝聚孤子相位脉冲宽度变窄, 3 dB处约为102.5 ns, 且在中心位置处出现一尖峰脉冲, 其宽度应在1 ns以下. 由于没有自相关仪, 无法确认尖峰脉冲的具体宽度和形状. 分析认为, 该尖峰脉冲应是由于腔内存在的光谱窄化机理, 实现了耗散孤子锁模, 使得脉冲宽度极窄, 但由于其能量较低, 并不能从输出光谱上判断其具体结构^[27].

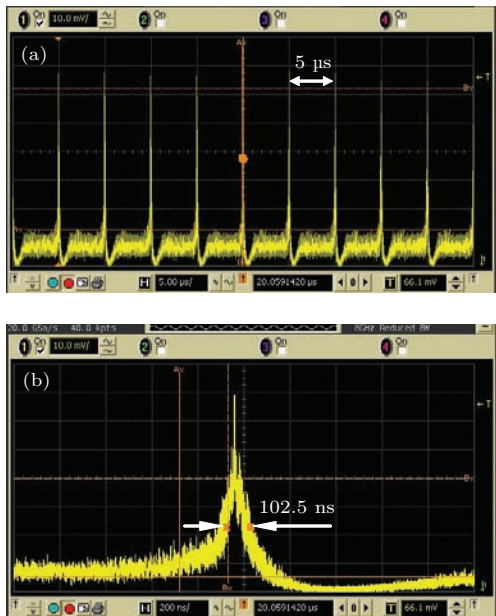


图5 (网刊彩色) 孤子雨脉冲序列和单脉冲 (a) 脉冲序列; (b) 单脉冲

Fig. 5. (color online) Pulse train of the soliton rain: (a) Oscilloscope trace; (b) single pulse.

本实验中获得两种状态的多波长锁模脉冲均具有相同的重复频率, 最新研究表明, 采用单个负色散线性啁啾布拉格光栅, 基于布拉格光栅的分步反馈机理, 通过改变腔内偏振态, 可实现重复频率随工作波长线性变化的可调谐锁模光纤激光器^[28],

这种重复频率的灵活性使得输出波长调谐和进一步应用更加方便. 与之不同的是, 本文实验装置中没有分布反馈造成的腔长变化机理, 只是利用基于D型光纤的SWCNT-SA引入的光纤双折射效应, 腔长不随工作波长的改变而改变, 因而具有固定的重复频率. 这种固定重复频率光纤激光器单脉冲内含有多个波长, 可应用在波分复用、抽运探测或生物学医学诊断等领域.

同一抽运功率下测得光谱如图6所示, 从图中可以看出脉冲激光为双波长锁模, 主峰中心波长为1080.162 nm, 3 dB谱线宽度为0.17 nm, 次峰中心波长1074.256 nm, 与噪声型锁模光谱对应位置基本一致, 与之不同的是长波长侧没有出现峰值, 只存在极低的连续激光背景^[29].

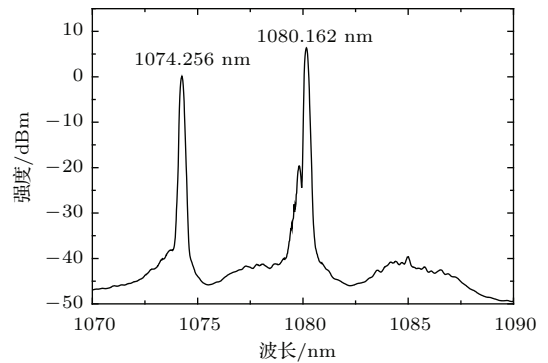


图6 孤子雨锁模状态的脉冲激光输出光谱图

Fig. 6. Optical spectrum of the soliton rain.

由于采用了较长的腔长和较低调制深度(4.7%)的碳纳米管饱和吸收体, 脉冲分裂容易发生, 我们也观察到了噪声型孤子和孤子雨两种现象. 但实验过程中, 调整偏振控制器均没有发现稳定的谐波孤子锁模. 分析认为, 谐波孤子的形成需要腔内多个脉冲噪声获得足够的增益, 且腔内色散、增益饱和行为和非线性相移等条件达到平衡时, 才能形成稳定的谐波孤子锁模^[30,31]. 谐波孤子锁模可以获得可调的高重复频率, 脉冲宽度窄但脉冲能量低. 在本实验中调整抽运功率和腔内偏振态的过程中, 脉冲噪声没有获得足够的净增益, 导致形成低强度的漂移脉冲, 部分脉冲漂移形成凝聚相位, 因此实验中只观察到孤子雨的形成. 从输出特性上看, 孤子雨为基本重复频率, 脉冲宽度更窄, 脉冲能量更大. 通过严格控制偏振态及抽运功率, 实现谐波孤子和孤子雨多种锁模状态, 可以更加清晰地理解多脉冲锁模的动力学行为.

从图4和图6两个光谱图可以看出激光输出光谱均为多波长, 表明腔内存在滤波机理造成多波长

现象. 实验中, 我们进一步分析了产生多波长输出光谱的滤波机理. 如图 7(a) 所示, 利用掺镜光纤的荧光谱进行测试, 依次接入 1 km 的 C1060 单模光纤、偏振控制器、偏振无关隔离器、SWCNT-SA 进行测试, 将 SWCNT-SA 之前和通过之后的光谱做比值得到 SWCNT-SA 的透射光谱, 图 7(b) 所示为透射光谱损耗与波长间的关系曲线. 从图中可以看出, SWCNT-SA 引入了滤波效应, 峰值与波谷间的损耗差约为 0.8 dB. 在石墨烯沉积 D 型光纤器件 [32] 和锥形光纤器件 [33] 中均出现该现象. 分析认为, 由于饱和吸收体增强了 D 型光纤的偏振选择特性, 此时的 SWCNT-SA 等效为一个检偏器 [34], 与偏振控制器结合实现了双折射梳状光谱滤波. 实验中发现, 调整偏振控制器, 梳状光谱表现出整体移动. 在 SWCNT-SA 作用下, 损耗曲线波谷波长分别为 1072.17, 1079.11 和 1086.85 nm, 其间隔与激光锁模脉冲的光谱峰中心波长位置基本一致, 数值偏差是由于实验过程中偏振态调节位置偏差造成的.

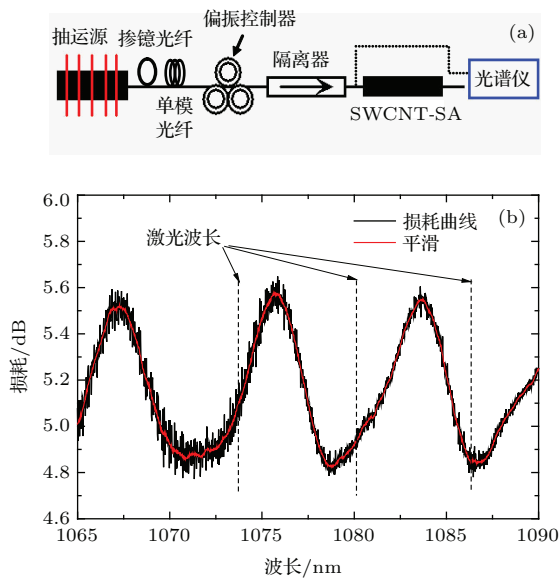


图 7 (网刊彩色) SWCNT-SA 的光谱透射率 (a) 检测装置; (b) 光谱损耗曲线
 Fig. 7. (color online) Spectrum transmittance of the SWCNT-SA: (a) Schematic of the measuring device; (b) spectral loss curve.

这种腔内弱的光纤双折射效应造成的多波长锁模激光与利用多个不同中心波长啁啾布拉格光栅不同 [35]. 采用多个啁啾布拉格光栅, 每个波段是由不同位置处、不同中心波长的啁啾光栅窄带反射确定, 其往返经历的谐振腔长度不同, 因而每个波长具有不同的重复频率. 另外, 每个波段各自独立在腔内运转, 经历与光纤长度成比例的色散和非

线性相移等参数作用, 因而具有不同的时域和频域特性. 而本实验中多波长的实现是基于 D 型光纤 SWCNT-SA 引入的双折射效应, 多个波长均具有同一腔长且脉冲间存在增益竞争等相互影响, 造成本实验中出现噪声型孤子和孤子雨两种多脉冲锁模状态.

随着抽运功率的增加, 超长腔锁模掺镜光纤激光器的单脉冲能量和平均输出功率不断增加. 图 8 所示为激光器平均输出功率和单脉冲能量随抽运功率的变化关系. 当抽运功率为 1.806 W 时, 噪声型锁模状态的输出功率达到最大, 约为 36.4 mW, 此时最高单脉冲能量约为 182.0 nJ. 输出功率随抽运功率的变化曲线为近似线性变化, 线性拟合后斜效率为 0.028. 调整偏振控制器后获得孤子雨, 此状态随着抽运功率增加到 1.929 W, 获得的最高输出功率约为 40.3 mW, 此时单脉冲能量约为 201.5 nJ. 实验结果与文献报道相比, 重复频率更低, 获得的单脉冲能量更高. 需要指出的是, 在抽运功率为 1.806 W 时, 调整偏振控制器获得孤子雨, 保持偏振控制器位置不变, 减小抽运功率, 可以保持孤子雨状态至约 1.55 W, 再减小抽运功率, 孤子雨状态无法保持, 在该偏振状态下进入无序的多脉冲状态. 此时调整偏振控制器可以回到噪声型孤子锁模.

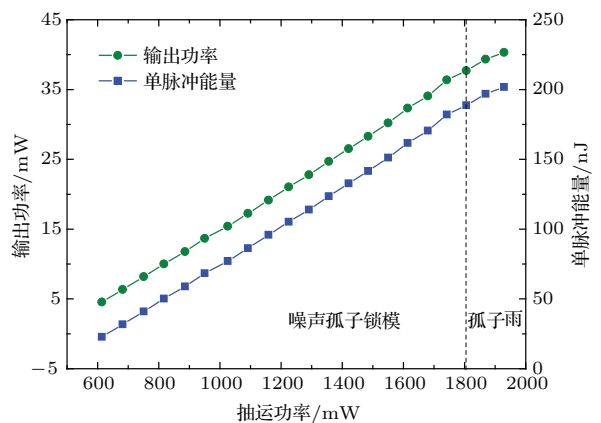


图 8 (网刊彩色) 输出功率和单脉冲能量随抽运功率的变化
 Fig. 8. (color online) Output power and pulse energy vary with pump power.

利用 SWCNT-SA 可以实现皮秒级或飞秒级脉冲锁模, 或同时产生皮秒级和飞秒级的超短脉冲 [36], 通过增加腔长可以实现纳秒级脉冲. 皮秒和飞秒级超短脉冲具有更高的峰值功率但脉冲能量低, 需经复杂的光学放大系统进行脉冲能量放大. 而长腔锁模光纤激光器的纳秒级脉冲在同一平均功率下具有更高的脉冲能量, 特别是 1 μm 波段光

信号在硅介质光纤中经历正色散, 容易实现大线性啁啾纳秒级脉冲, 易于实现脉冲压缩, 可作为种子源应用于超连续谱及全光纤放大系统等领域.

选用不同管径分布和浓度的单壁碳纳米管, 可以实现不同脉宽、不同波段的多种光学孤子现象, 体现了碳纳米管作为快速饱和吸收体的优良特性. 另外, 其宽带工作特性也使其成为波长可调谐和多波长锁模光纤激光器的一种优选锁模材料, 本文多波长锁模的实验结果正好说明了这一点.

从以上实验结果来看, 本文获得的光纤激光器的光-光转换效率不高, 约为5.6%. 原因在于: 抽运源输出多模光纤与双包层光纤的熔接损耗较大, 实验中测试约为10 dB; 另一方面, SWCNT-SA 的非饱和损耗较高, 约为57.8%, 使得腔内损耗较大. 进一步优化D型光纤结构, 降低非饱和损耗, 有望获得更高的光-光转换效率.

5 结 论

通过延长被动锁模光纤激光器的腔长是实现低重复频率、高脉冲能量超短脉冲的简单可行的技术方案. 为获得更低的重复频率和更高的脉冲能量, 我们制作了基于D型光纤倏逝场与单壁碳纳米管相互作用的饱和吸收体, 利用双包层掺镱光纤作为增益介质, 环形腔内增加1 km的C1060单模光纤实现了1021.2 m 腔长的被动锁模光纤激光器. 该激光器实现了自启动锁模, 实验得到噪声型孤子锁模和孤子雨两种不同的锁模状态. 由于D型光纤引入的双折射特性使得激光输出为多波长光谱, 实验结果表明管径在一定范围内分布的SWCNT具有良好的宽带工作特性. 锁模脉冲的重复频率约为199.8 kHz. 当抽运功率为1.929 W时, 孤子雨状态的凝聚孤子相位获得的脉冲宽度约为102.5 ns, 最高输出功率达到了40.3 mW, 此时单脉冲能量约为201.5 nJ, 与文献报道相比, 输出功率和单脉冲能量更高. 下一步工作将优化激光器的结构, 降低非饱和损耗, 获得更高的光-光转换效率.

参考文献

- [1] Liu X M, Mao D, Wang L R 2012 *Chin. Sci. Bull.* **57** 3039 (in Chinese) [刘雪明, 毛东, 王孺然 2012 科学通报 **57** 3039]
- [2] Gou D, Yang S, Zhang L, Wang X, Chen H, Chen M, Xie S, Chen W, Luo W 2014 *Chin. Phys. B* **23** 114204
- [3] Fermann M E, Hartl I 2013 *Nature Photon.* **7** 868
- [4] Xu Z W, Zhang Z X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104210 (in Chinese) [徐中巍, 张祖兴 2013 物理学报 **62** 104210]
- [5] Bai D, Li W, Yang K, Shen X, Chen X, Zeng H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 104208
- [6] Yu H, Wang X, Zhou P, Xu X, Chen J 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 737
- [7] Senoo Y, Nishizawa N, Sakakibara Y, Sumimura K, Itoga E, Kataura H, Itoh K 2010 *Opt. Express* **18** 20673
- [8] Yang J H, Guo C Y, Ruan S C, Ouyang D Q, Lin H Q, Wu Y M 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 024208
- [9] Song R, Chen H W, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2011 *J. Opt.* **13** 035201
- [10] Lin J H, Jhu J L, Jyu S S, Lin T C, Lai Y 2013 *Laser Phys.* **23** 025103
- [11] Zheng X W, Luo Z C, Liu H, Liu H, Zhao N, Ning Q Y, Liu M, Feng X H, Xing X B, Luo A P, Xu W C 2014 *Appl. Phys. Express* **7** 042701
- [12] Lin J H, Lai B C, Lee Y W 2015 *Laser Phys.* **25** 045101
- [13] Liu X, Cui Y 2015 *Sci. Rep.* **5** 9399
- [14] Wang S S, Pan Y Z, Gao R X, Zhu X F, Su X H, Qu S L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024209 (in Chinese) [王莎莎, 潘玉寨, 高仁喜, 祝秀芬, 苏晓慧, 曲士良 2013 物理学报 **62** 024209]
- [15] Ismail M A, Harun S W, Zulkepely N R, Nor R M, Ahmad F, Ahmad H 2012 *Appl. Opt.* **51** 8621
- [16] Woodward R I, Kelleher E J R, Popa D, Hasan T, Bonaccorso F, Ferrari A C, Popov S V, Taylor J R 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 1672
- [17] Song Y W, Yamashita S, Maruyama S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 021115
- [18] Pan Y, Miao J, Liu W, Huang X, Wang Y 2014 *Laser Phys. Lett.* **11** 095105
- [19] Pan Y, Liu W, Tian Z, Wang S, Su X, Liu Y, Qu S 2013 *Laser Phys.* **23** 085110
- [20] Smirnov S, Kobtsev S, Kukarin S, Ivanenko A 2012 *Opt. Express* **20** 27447
- [21] Cheng Z, Li H, Wang P 2015 *Opt. Express* **23** 5972
- [22] Zhao L M, Tang D Y, Wu J, Fu X Q, Wen S C 2007 *Opt. Express* **15** 2145
- [23] Chouli S, Grelu P 2010 *Phys. Rev. A* **81** 063829
- [24] Bao C, Xiao X, Yang C 2013 *Opt. Lett.* **38** 1875
- [25] Xu Y, Song Y L, Du G G, Yan P G, Guo C Y, Zheng G L, Ruan S C 2015 *Laser Phys. Lett.* **12** 045108
- [26] Meng Y C, Zhang S M, Li X L, Li H F, Du J, Hao Y P 2012 *Opt. Express* **20** 6685
- [27] Zhang L, Wang G, Hu J, Wang J, Fan J, Wang J, Feng Y 2012 *IEEE Photo. J.* **4** 1809
- [28] Liu X, Cui Y, Han D, Yao X, Sun Z 2015 *Sci. Rep.* **5** 9101
- [29] Huang S, Wang Y, Yan P, Zhao J, Li H, Lin R 2014 *Opt. Express* **22** 11417
- [30] Liu X M, Wang T, Shu C, Wang L R, Lin A, Lu K Q, Zhang T Y, Zhao W 2008 *Laser Phys.* **18** 1357
- [31] Huang S S, Wang Y G, Li H Q, Lin R Y, Yan P G 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084202 (in Chinese) [黄诗盛, 王勇刚, 李会权, 林荣勇, 闫培光 2014 物理学报 **63** 084202]
- [32] Ubeid M F, Shabat M M 2015 *Appl. Phys. A* **118** 1113

- [33] Zhang C, Luo Z Q, Wang J Z, Zhou M, Xu H Y, Cai Z P 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 602006 (in Chinese) [张成, 罗正钱, 王金章, 周敏, 许惠英, 蔡志平 2012 中国激光 **39** 602006]
- [34] Bao Q, Zhang H, Wang B, Ni Z, Lim C H Y X, Wang Y, Tang D Y, Loh K P 2011 *Nat. Photon.* **5** 411
- [35] Liu X, Han D, Sun Z, Zeng C, Lu H, Mao D, Cui Y, Wang F 2013 *Sci. Rep.* **3** 2718
- [36] Han D D, Liu X M, Cui Y D, Wang G X, Zeng C, Yun L 2014 *Opt. Lett.* **39** 1565

Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes*

Wang Yu-Bao¹⁾ Qi Xiao-Hui²⁾ Shen Yang¹⁾ Yao Yi-Lei¹⁾ Xu Zhi-Jing¹⁾ Pan Yu-Zhai^{1)†}

1) (School of Science, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

2) (School of Information and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

(Received 16 April 2015; revised manuscript received 19 May 2015)

Abstract

We demonstrate an ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes. The total length of the fiber laser is 1021.2 m. The different regimes of noise-like soliton and soliton rain mode-locking with the multi-wavelength operation are experimentally obtained with a repetition rate of 199.8 kHz. The higher output power and pulse energy from the soliton rain are measured to be 40.3 mW and 201.5 nJ, respectively, with a pulse width of about 102.5 ns.

Keywords: mode-locked fiber laser, carbon nanotube, ultra-long cavity, Yb-doped fiber

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Sf, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.64.204205

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2010FQ017) and the Innovation Foundation of Natural Science Research of Harbin Institute of Technology, China (Grant No. NIT. NSRIF. 2009146).

† Corresponding author. E-mail: panyzh2002@163.com