

1027 nm 大模场双包层光子晶体光纤半导体可饱和吸收镜锁模激光器

李平雪 杨 春 赵自强 池俊杰 姚毅飞 张光举 胡浩伟

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 报道了基于半导体可饱和吸收镜锁模的大模场面积双包层掺镱光子晶体光纤(PCF)激光器。激光器采用环形腔结构,腔内无色散补偿机理,使其工作在全正色散锁模状态,在耦合进入光子晶体光纤的功率为12.2 W时获得了脉冲宽度为3.3 ps,重复频率高达93.33 MHz的稳定锁模脉冲激光输出,中心波长为1027 nm,3 dB线宽为1 nm,在耦合进入光子晶体光纤的功率为14 W时获得最高输出功率150 mW,激光器可连续稳定工作2 h以上,没有出现失锁现象。在不同实验条件中,观察到调Q锁模和脉冲分裂现象,并分别给出了分析和解释。

关键词 激光器; 光纤激光器; 被动锁模; 半导体可饱和吸收镜; 环形腔

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0502007

1027 nm Large-Mode-Area Double-Cladding Photonic Crystal Fiber Mode-Locked Laser Based On SESAM

Li Pingxue Yang Chun Zhao Ziqiang Chi Junjie Yao Yifei
Zhang Guangju Hu Haowei

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A large-mode-area double-cladding Yb-doped photonic crystal fiber (PCF) mode-locked laser based on semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is reported. Without any pulse compression mechanism, a pulse with duration of 3.3 ps and repetition frequency of 93.33 MHz is generated in a ring cavity when the power coupling into the fiber reaches 12.2 W. The central wavelength and the spectrum bandwidth are 1027 nm and 1 nm, respectively. When the power coupling into the fiber reaches 14 W, a maximum output power of 150 mW can be achieved. The laser can work stably for 2 h. Q-switched and pulse splitting are observed and analyzed.

Key words lasers; fiber laser; passively mode-locking; semiconductor saturable absorber mirror; ring cavity

OCIS codes 060.2310; 140.4050; 140.3615; 140.3510

1 引 言

被动锁模光纤激光器具有结构紧凑、散热效果好、光束质量好等优点,近年来成为了研究的热点^[1-4],随着光纤技术和锁模技术的不断发展和进步,光纤激光器产生的超短脉冲的性能已经基本达到传统固体锁模激光器的水平,已经被广泛应用于光通信、激光微加工和光探测等领域。目前,在已报道的被动锁模光纤激光器中,主要利用了8字型腔

结构、非线性偏振旋转、半导体可饱和吸收镜(SESAM)等锁模机制^[5-6]。相比于其他锁模机制,SESAM锁模具有性能稳定、结构紧凑等优点,并且SESAM的饱和通量、调制深度等参数可以灵活选择,使得激光器具有很高的灵活性。如今,SESAM已经被广泛应用于固体激光器和光纤激光器中,光谱范围从800 nm延伸到3000 nm。2007年,王旌等^[7]基于SESAM和环形腔结构实现了中心波长为

收稿日期: 2013-11-11; 收到修改稿日期: 2013-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(61205047)

作者简介: 杨 春(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: yangchun@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 李平雪(1974—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事超短脉冲光纤激光及放大技术方面的研究。

E-mail: pxli@bjut.edu.cn(通信联系人)

1562.8 nm、脉宽为 377 fs 的短脉冲激光器。2008 年,Chong 等^[8]利用单模保偏光纤作为增益介质,基于 SESAM 和线性腔结构,实现了重复频率 33 MHz,脉宽 6 ps,单脉冲能量 2.2 nJ 的全正色散被动锁模激光器,脉冲经过腔外压缩后为 300 fs。2009 年,陈胜平等^[9]利用 SESAM 和光纤光栅实现了脉冲宽度 36 ps,中心波长 1064 nm 的被动锁模单模光纤激光器,放大后平均功率达到 1.9 W。2013 年,谭方舟等^[10]利用 SESAM 和基于多模干涉原理的光纤滤波器实现了波长 1067 nm,脉宽 21 ps,单脉冲能量 0.43 nJ 的全光纤耗散孤子锁模激光器。以上报道的研究工作中多采用普通单模掺杂光纤作为增益介质实现 SESAM 锁模的。而单模光纤激光器由于受制于较小的纤芯面积带来的高非线性效应存在脉冲能量和峰值功率无法提升的问题。光子晶体光纤的出现很大程度上解决了这一问题。

光子晶体光纤由于其独特的导光机理、灵活多变的结构和丰富独特的优越性能,为各种光纤器件及技术的发展开辟了新的思路。采用大模场面积光子晶体光纤克服了传统单模光纤由于小纤芯结构导致的高非线性效应限制了脉冲能量进一步提高的问题,如过多的非线性效应会产生脉冲分裂;而与普通的大模场双包层光纤相比,光子晶体光纤在纤芯直径增加的同时还会保持单模输出,在降低非线性效应的同时还避免了锁模时出现高阶模以及模式之间的耦合影响锁模质量和稳定性的问题。所以,光子晶体光纤具有的大模场面积单模特性,使激光器可以实现高功率情况下的单模运转。目前,利用掺镱光子晶体光纤为增益介质的脉冲光纤激光器在输出功率上已经达到了数十瓦的水平。例如,Baumgartl 等^[11]在 2012 年利用大模场光子晶体光纤为增益介质,获得了平均功率为 66 W 的激光输出。2008 年,宋有建等^[12]基于偏振旋转技术结合饱和吸收体,用双包层大模场面积掺镱光纤构成环形腔,实现波长为 1079 nm,脉宽为 10.6 ps 的激光器。2011 年,张大鹏等^[13]使用 2.2 m 的掺镱大模场光子晶体光纤作为增益介质,利用非线性偏振旋转以及滤光片提供的耗散作用实现了中心波长 1038 nm,脉冲宽度 1.03 ps,平均功率 10 W 的稳定锁模。2012 年,谢辰等^[14]构建了基于多通单元的高能量耗散孤子锁模光纤激光器,平均功率为 4.9 W,对应单脉冲能量为 314 nJ,中心波长为 1038 nm。2013 年,本课题组报道了瓦级的大模场双包层掺镱光子晶体光纤可调谐锁模输出,脉冲宽度为 7.6 ps^[15]。这些结果充分

体现了大模场光子晶体光纤在实现高功率锁模方面的独特优势。

在以上的大模场光子晶体光纤锁模激光器的研究结果中,大都实现了 1030 nm 以上波段范围的稳定锁模,都采用 976 nm 激光二极管(LD)作为抽运源。本文选用大模场双包层掺镱光子晶体光纤作为增益介质,采用环形腔结构,利用 SESAM 作为锁模器件,首次实现了 1030 nm 波段以内 1027 nm 短波段的稳定锁模输出,脉冲宽度为 3.3 ps,实验中采用光纤耦合输出的 915 nm LD 作为抽运源。这主要是由于镱离子在 915 nm 吸收带很宽,因此 915 nm 抽运源的温度变化、波长漂移等因素对振荡器的影响较 976 nm 抽运源小得多,不需精确控温。另外,1027 nm 波段激光器通过倍频后可产生波长 514 nm 左右蓝绿光输出,可作为氩离子激光器的替代光源,在水下探测等领域具有重要的应用价值。

2 实验装置

基于 SESAM 的大模场双包层光子晶体光纤锁模激光器的实验装置示意图如图 1 所示,实验中采用了空间耦合方式的环形腔结构。抽运源使用尾纤输出的 915 nm 半导体激光器,最大功率为 30 W,抽运光通过非球面透镜组耦合进增益光纤。增益光纤采用的大模场面积双包层掺镱光子晶体光纤纤芯直径为 40 μm ,内包层直径为 170 μm ,该光纤对 915 nm 的抽运光具有 4.5 dB/m 的吸收系数。增益光纤长度为 1 m,弯曲直径约 20 cm,两个端面均打磨成 8°以避免光纤端面反馈形成的自激振荡。DM₁ 为双色镜,用来分离抽运光和激光,为保证激光在腔内单向运转,腔内加入隔离度为 40 dB 的空间隔离器,同时利用隔离器的一个逃逸窗作为激光输出端口,可通过旋转波片调节腔内能量和输出。SESAM 的调制深度、饱和

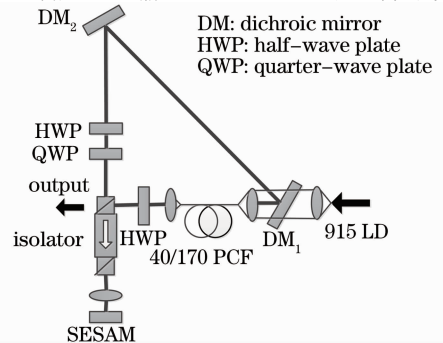


图 1 基于 SESAM 的被动锁模光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of passively mode-locked fiber laser based on SESAM

通量、恢复时间分别为 35%, 30 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 和 500 fs。利用一个聚焦透镜将激光聚焦在 SESAM 上, 以获得稳定锁模所需的激光功率密度。

3 实验结果及分析

实验中发现随着抽运功率的增加, 与通常的锁模激光器一样, 大模场双包层光子晶体光纤 SESAM 锁模激光器会经历一系列不同的输出状态。在抽运功率达到锁模阈值之前, 激光器一直处于连续波运转状态; 增大耦合进入光纤的功率到 11.4 W 时, 仔细调节 SESAM 上的光斑大小, 旋转波片控制腔内能量, 同时尽量减少腔内的各种损耗(光纤弯曲损耗、耦合损耗等), 调节到某一状态时, 产生稳定的调 Q 锁模脉冲序列, 如图 2 所示。调 Q 包络重复频率为 264 kHz, 此时输出功率为 20 mW, 耦合进入光纤的功率在 11.4 W 到 12.2 W 变化时, 均可保持稳定的调 Q 锁模脉冲输出。

一般实现稳定锁模需经过调 Q、调 Q 锁模和连续锁模 3 个过程, 调 Q 锁模状态是锁模过程中介于调 Q 状态与连续锁模状态之间的一种不稳定状态。对于锁模过程中调 Q 锁模的产生, 主要是由于腔内的激光功率密度太低, 通过聚焦后在 SESAM 上的功率密度达不到稳定锁模的阈值功率。SESAM 的饱和通量为 30 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$, 要克服调 Q 锁模, 实现稳定连续锁模, 要求 SESAM 内激光光强处于深度饱和状态, 通常需要 3~5 倍于饱和通量。调 Q 锁模状态下产生的峰值功率很高的强脉冲容易损坏 SESAM, 为了抑制这种现象, 需要激光器具有大的小信号增益和小的腔内损耗。可以通过增加抽运功率来增加腔内能量密度以达到稳定锁模状态。

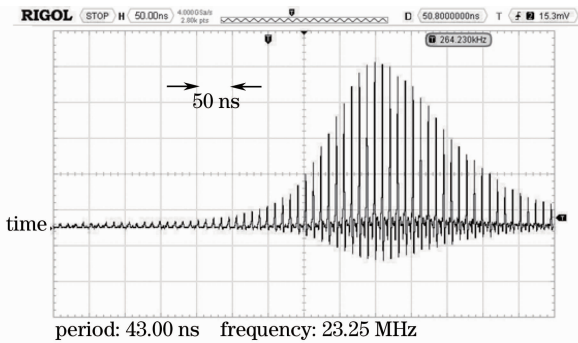


图 2 调 Q 锁模脉冲序列

Fig. 2 Q-switched mode-locked pulse train

当实验中耦合进入光纤的功率超过 12.2 W 时, 同时轻微调整波片角度, 可以得到稳定的锁模脉冲序列, 如图 3 所示。锁模脉冲重复频率为

93.33 MHz, 与激光器等效腔长 3.2 m 相符。

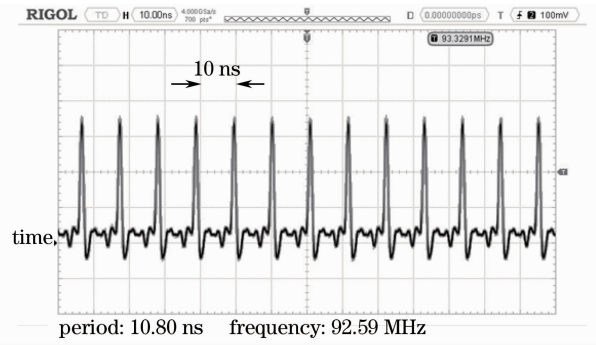


图 3 稳定连续锁模脉冲序列

Fig. 3 Diagram of continuous wave stable mode-locked pulse train

实验中激光腔内未使用任何色散补偿元件, 也没有引入滤光片构成耗散孤子锁模机理, 激光器工作于全正色散锁模区域, 仅利用 SESAM 的非线性可饱和吸收作用作为稳定锁模的主导因素, 实现全正色散区域的稳定锁模运转。图 4 给出实验中测得的稳定锁模激光输出时的光谱曲线。从图中可以看出, 锁模激光的中心波长位于 1027 nm, 3 dB 线宽为 1 nm, 光谱没有形成陡峭的边沿, 不具备耗散孤子锁模的典型特征, 因此判断激光腔内还没有形成耗散孤子锁模^[16-17]。从镱离子的发射谱可知, 运转于四能级系统时, 激光输出通常从 1010 nm 延伸到 1100 nm。目前, 在已报道的研究结果中大都实现了 1030 nm 以上波段的锁模输出, 而本实验中首次实现了掺镱光纤 1030 nm 以内的短波段锁模脉冲输出。主要原因是由于实验中所用的主要光学元件如波片、双色镜等, 镀膜中心波长都在 1030 nm 以下, 从而有效抑制了长波段激光起振; 其次, 实验中使用的光纤长度较短为 1 m, 较短的光纤长度有利于短波段的激光起振^[18]。实验中发现, 当抽运功率在 12.2~13.8 W 变化时, 均可保持稳定的锁模脉冲, 最大输出功率为 150 mW。功率输出最大时, 对

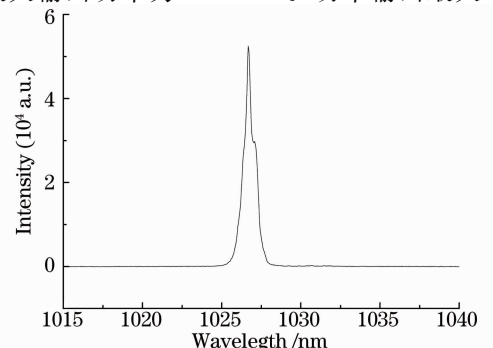


图 4 稳定锁模激光器的输出光谱

Fig. 4 Spectral curves of stable mode-locked fiber laser

应抽运功率为 2.8 W, 计算得到光光转换效率为 5.4%。激光器稳定连续锁模工作 2 h 以上, 没有出现失锁现象, 非常稳定, 光谱基本没有变化。使用自相关仪(德国 APE 公司)测量脉冲的宽度, 测得的自相关曲线如图 5 所示。脉冲形状为高斯型, 获得的脉冲宽度为 3.3 ps。

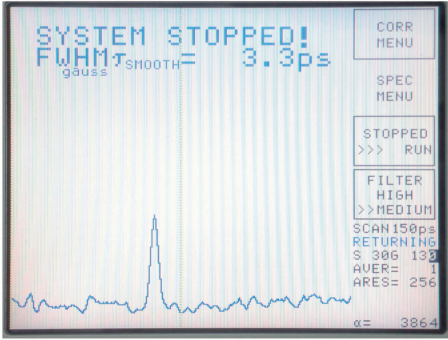


图 5 脉冲自相关曲线

Fig. 5 Autocorrelation trace of the mode-locked pulse

实验中发现, 当继续增大耦合进入光纤的功率超过 13 W 时, 脉冲波形出现了分裂的迹象, 如图 6 所示。此时脉冲重复频率没有发生变化仍为 93.33 MHz, 若稍微调节波片角度使输出功率变大, 脉冲波形即恢复正常状态, 分裂现象消失。分析实验中出现这种现象的主要原因是 SESAM 内能量密度过大造成其处于过饱和状态, 引起脉冲形状畸变甚至分裂。调节波片增大输出功率使腔内功率密度降低后波形分裂迹象消失也证实了这一点。在其他波长 1040 nm 类似的实验中, 在高功率输出下已经观察到了明显的脉冲分裂现象, 脉冲的重复频率增加了一倍, 在本实验中由于输出功率 150 mW 相对较低, 所以通过实验的调整可以避免脉冲分裂, 相信再增加抽运功率, 由于 SESAM 上功率密度过高也会产生脉冲分裂的现象^[15]。

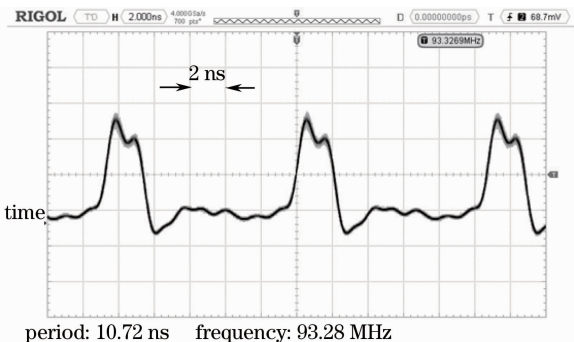


图 6 脉冲分裂迹象

Fig. 6 Diagram of pulse splitting

4 结 论

报道了利用半导体可饱和吸收镜作为锁模器件, 大模场双包层掺镱光子晶体光纤作为增益介质, 获得了中心波长 1027 nm, 重复频率 93.33 MHz, 脉宽 3.3 ps 的稳定连续锁模脉冲输出。当耦合进入光纤的功率为 13.8 W 时, 连续锁模输出最大功率为 150 mW。实验中在不同实验条件下观察到调 Q 锁模及脉冲分裂迹象, 并对实验现象及结果给出了合理的分析。

参 考 文 献

- Zhong Yihui, Zhang Zuxing, Tao Xiangyang. Research progress of passively mode-locked fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(8): 46-51.
钟义晖, 张祖兴, 陶向阳. 被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(8): 46-51.
- Peng Can, Yao Minyu, Zhang Hongming, *et al.*. 10 GHz actively mode-locked fiber ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(2): 101-104.
彭 璨, 姚敏玉, 张洪明, 等. 10 GHz 主动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2003, 30(2): 101-104.
- Dupriez P, Piper A, Malinowski A, *et al.*. High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm[J]. Photon Technol Lett, 2006, 18(9): 1013-1015.
- Chen S P, Chen H W, Hou J, *et al.*. 100 W all fiber picosecond MOPA laser[J]. Opt Express, 2009, 17(26): 24008-24012.
- De Souza E A, Soccolich C E, Pleibel W, *et al.*. Saturable absorber modelocked polarisation maintaining erbium-doped fibre laser[J]. Electron Lett, 1993, 29(5): 447-449.
- Kong L J, Xiao X S, Yang C X. Low-repetition-rate all-fiber all-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber laser[J]. Laser Phys Lett, 2010, 7(5): 359.
- Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun, *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 163-165.
王 旌, 张洪明, 张 隳, 等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 163-165.
- Chong A, Renninger W H, Wise F W. Environmentally stable all-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. Opt Lett, 2008, 33(10): 1071-1073.
- Chen Shengping, Lin Dongfeng, Hou Jing, *et al.*. Passively mode locked Yb-doped fiber laser with nearly 2 W average output power[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2817-2821.
陈胜平, 林东风, 侯 静, 等. 平均功率近 2 W 的被动锁模皮秒掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2817-2821.
- Tan Fangzhou, Liu Jiang, Sun Ruoyu, *et al.*. All-normal-dispersion passively mode-locked Yb-doped fiber laser with multimode interference effect [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402010.
谭方舟, 刘 江, 孙若愚, 等. 基于多模干涉效应的全正色散被动锁模掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402010.
- Baumgartl M, Lecaplain C, Hideur A, *et al.*. 66 W average power from a microjoule-class sub-100 fs fiber oscillator[J]. Opt Letters, 2012, 37(10): 1640-1642.
- Song Youjian, Hu Minglie, Liu Qingwen, *et al.*. A mode-locked Yb³⁺-doped double-clad large-mode-area fiber laser [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5045-5048.
宋有建, 胡明列, 刘庆文, 等. 掺 Yb³⁺ 双包层大模场面积光纤锁模激光器[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5045-5048.

- 13 Zhang Dapeng, Hu Minglie, Xie Chen, *et al.*. A high power photonic crystal fiber laser oscillator based on nonlinear polarization rotation mode-locking [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(4): 044206.
张大鹏, 胡明列, 谢辰, 等. 基于非线性偏振旋转锁模的高功率光子晶体光纤飞秒激光振荡器[J]. *物理学报*, 2012, 61(4): 044206.
- 14 Xie Chen, Hu Minglie, Zhang Dapeng, *et al.*. High energy dissipative soliton mode-locked fiber oscillator based on a multipass cell [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(5): 054203.
谢辰, 胡明列, 张大鹏, 等. 基于多通单元的高能量耗散孤子锁模光纤振荡器[J]. *物理学报*, 2013, 62(5): 054203.
- 15 Li P X, Liu Z, Chi J J, *et al.*. A picosecond ytterbium-doped double-clad fiber amplifier with a SESAM mode locking PCF oscillator as the seed source[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(7): 075104.
- 16 Zhang Xin, Hu Minglie, Song Youjian, *et al.*. Dissipative-soliton mode locked laser based on large-mode-area photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1863–1869.
张鑫, 胡明列, 宋有健, 等. 大模场面积光子晶体光纤耗散孤子锁模激光器[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 1863–1869.
- 17 K Kieu, W H Renninger, A Chong, *et al.*. Sub-100 fs pulses at watt-level powers from a dissipative-soliton fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(5): 593–595.
- 18 Shuzhen Zou, Pingxue Li, Linghao Wang, *et al.*. 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser and its frequency-doubling with BiBO[J]. *Appl Phys B*, 2009, 95(4): 685–690.

栏目编辑: 宋梅梅