

文章编号: 0258-7025(2007)12-1603-04

用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光

王清月, 胡明列, 宋有建, 刘庆文, 刘博文, 张 弛, 李 毅, 柴 路

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 最近许多实验结果表明掺 Yb 光纤在提高输出功率方面还有很大潜力, 而且由于大模面积光子晶体光纤的使用, 飞秒光纤激光器的输出已经可以与传统飞秒固体激光器相比拟。报道了利用掺 Yb 的保偏型大模面积光子晶体光纤进行锁模和放大方面取得的实验结果, 光子晶体光纤振荡级输出重复频率为 51 MHz, 脉冲宽度为 450 fs, 平均功率为 2 W 的飞秒激光, 对应单脉冲能量 40 nJ; 同时利用国产双包层大模面积光纤进行了放大实验, 在平均功率为毫瓦量级的种子光脉冲输入情况下, 获得了 10^3 增益。

关键词 光纤光学; 大模场面积光子晶体光纤; 光纤激光器; 光纤放大器; 锁模; 飞秒

中图分类号 O 437 **文献标识码** A

Large-Mode-Area Photonic Crystal Fiber Laser Output High Average Power Femtosecond Pulses

WANG Qing-yue, HU Ming-lie, SONG You-jian, LIU Qing-wen,
Liu Bo-wen, ZHANG Chi, LI Yi, CHAI Lu

(Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Many experiments have proven the potential of power scaling of Yb-doped fibers when they are used in lasers and amplifiers. Recently, photonic crystal fibers have pushed the output parameters of femtosecond fiber laser to compare to the solid-state laser system. Our recently work on this field is presented in this paper. A mode-locking high energy photonic crystal fiber laser operating in the dispersion compensation free regime generates positively-chirped pulses with an average power 2 W of 51 MHz in a stable and self-starting operation. The energy of the pulse is up to 40 nJ and the pulse duration is 450 fs. A domestic Yb-doped double-cladding large-mode-area fiber was used for amplification experiment. With the milliwatt seed laser pulse inputting, 10^3 gain was obtained.

Key words fiber optics; large-mode-area photonic crystal fiber; fiber laser; fiber amplifier; mode locking; femtosecond

1 引 言

飞秒染料激光作为第一代飞秒激光, 开辟了飞秒超快新时代。飞秒钛宝石激光作为第二代飞秒激光, 开创了飞秒激光应用的新时代。但是由于众多机械零件、光学零件组成的光学系统使其操作复杂、稳定性差; 激光光束传输的开放性, 受周围环境影响极大, 因此整个系统不得不安置于超净、防震、恒温的特定实验室。光子晶体光纤^[1]飞秒激光器的出现以其独有的特点克服了第二代飞秒激光器的缺陷: 光子晶体光纤激光器可以由激光二极管(LD)直接

抽运, 转换效率可高达 50%~80%, 使成本大幅度下降; 飞秒激光器所需要的增益、色散和非线性三大功能可在光子晶体光纤中完成, 实现飞秒激光器由众多分离元件向一根光纤集成; 激光光束完全封闭在纤芯中, 大大降低了周围环境对它的影响, 使飞秒激光器从超净、恒温和防震的高级实验室中解放出来; 光子晶体光纤具有大的表面一体积比, 散热极好, 可以实现飞秒激光的高平均功率; 双包层结构大模面积光子晶体光纤能够在高功率情况下保证单模运转和极高的光束质量($M^2 \approx 1.2$), 这是普通光纤

收稿日期: 2007-11-14; 收到修改稿日期: 2007-11-16

基金项目: 国家重点基础研究(2003CB314904, 2006CB806002), 国家高技术研究发展计划(2007AA03Z447)和国家自然科学基金(60678012)资助项目。

作者简介: 王清月(1938—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超短脉冲激光技术方面的研究。E-mail: chywang@tju.edu.cn

无法比拟的^[2,3]。因此光子晶体光纤飞秒激光将能够把飞秒激光从贵族化中解放出来,走向大众化,成为相对完美的第三代飞秒激光系统,并为飞秒激光技术应用的普及化铺平道路。最近两年,国际上几个研究小组也在尝试将光子晶体光纤应用在飞秒激光光纤振荡器和放大器中。2005年10月,德国 Limpert 小组报道了利用掺镱的光子晶体光纤作为增益介质实现了131 W,220 fs的激光放大运转^[4]。在2006年丹麦和芬兰的科学家利用全固态带隙结构的增益光子晶体光纤初步实现了具有增益、色散、非线性一体的全光纤锁模激光器^[5],从此开始了光子晶体光纤飞秒激光器研究的新趋势、新潮流。最近德国 Limpert 小组 B. Ortac 等^[6]利用双包层大模场面积光子晶体光纤实现了孤子锁模,获得了平均功率880 mW,单脉冲能量16.5 nJ,脉冲宽度500 fs的稳定锁模脉冲输出,其单脉冲能量等技术指标已经达到普通的钛宝石飞秒激光器的水平,并且正在迅速向微焦耳量级的单脉冲能量迈进。经过两年的研究,我们实现了光子晶体光纤飞秒激光器

和光子晶体光纤飞秒激光放大器的稳定运转。

2 实 验

图1(a)为光子晶体光纤飞秒激光器的实验装置图,图1(b)为所用的掺Yb大模面积光子晶体光纤(Crystal fiber Inc.),大模面积纤芯直径70 μm ,具有的保偏结构能够简化腔内偏振控制元件并使得输出更加稳定。锁模激光实验中采用了相对简单的线性腔结构,腔内法拉第旋光晶体和格兰泰勒棱镜构成了输出装置,能够将腔内功率输出90%以上,在保证足够激光增益的情况下控制可饱和吸收镜(SESAM)上可承受的功率密度,防止可饱和吸收镜被打坏。可饱和吸收镜基于GaAs/AlAs布拉格反射镜上低温分子束外延技术生长的InGaAs量子阱结构,在1040 nm附近的调制深度为30%,饱和通量为100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,吸收恢复时间小于500 fs。其中port2为主输出口,port1为残余光输出,其输出大小决定于腔内各元器件的偏振消光比。

在不使用任何色散补偿元件的情况下,通过调

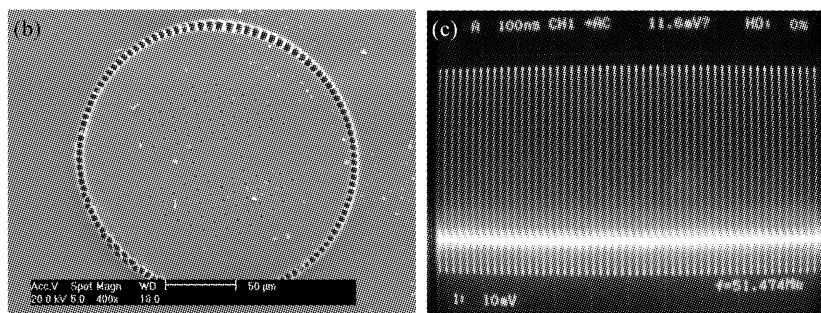
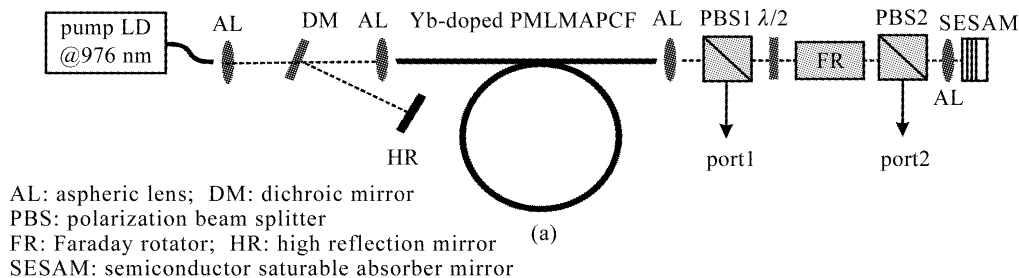


图1 (a) 实验装置图;(b) 光子晶体光纤端面的扫描电镜图;(c) 锁模的脉冲序列图

Fig. 1 (a) setup of the fiber oscillator; (b) SEM of PCF; (c) picture of pulse train

整可饱和吸收镜上聚焦点面积大小来启动获得稳定的锁模脉冲。当前获得了输出平均功率为2 W,重复频率为51 MHz的飞秒激光脉冲,对应单脉冲能量40 nJ。输出脉冲的光谱如图2(a)所示,光谱半宽度为8 nm,图2(b)为port1输出的残余光,这是由于光纤的保偏特性在高功率运转情况下并不完美所致,在主输出口port2输出2 W的情况下,port1也有450 mW的输出功率。输出脉冲的自相关曲线如

图3(a)所示,图3(b)为直接输出时的自相关曲线,测量的脉冲半宽度为3.76 ps,这是由于腔内无任何色散补偿元件,而非线性又相对较低,因此这里主要通过增益带宽的限制和可饱和吸收镜的非线性效应的共同作用来平衡自相位调制导致的光谱展宽,因此输出脉冲带有很大的啁啾。通过腔外光栅对的压缩,获得了宽度为450 fs的飞秒激光脉冲。相信通过进一步的系统实验,具有更高输出功率、更高单脉

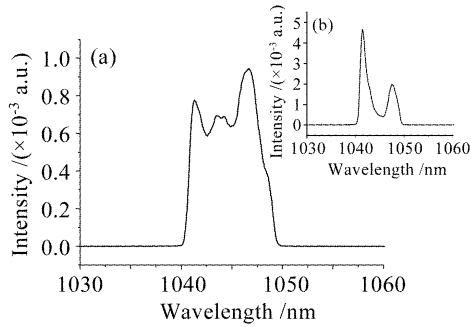


图 2 锁模输出的光谱(a)和 port1 的输出(b)

Fig. 2 Spectrum of the fiber oscillator (a) and spectrum of port1 (b)

冲能量、更短脉冲宽度的飞秒激光能在光子晶体光纤锁模激光器中获得。

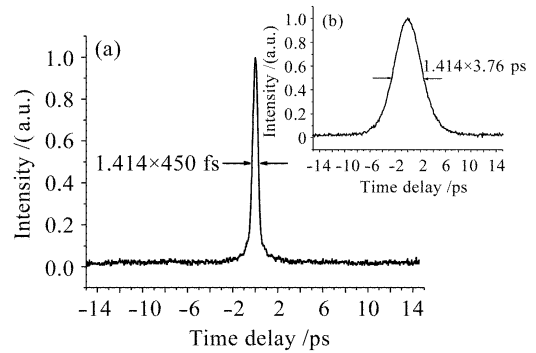


图 3 输出脉冲的自相关曲线(a)和未压缩前的自相关曲线(b)

Fig. 3 Autocorrelation trace of the dechirped pulse (a) and the directly emitted pulses (b)

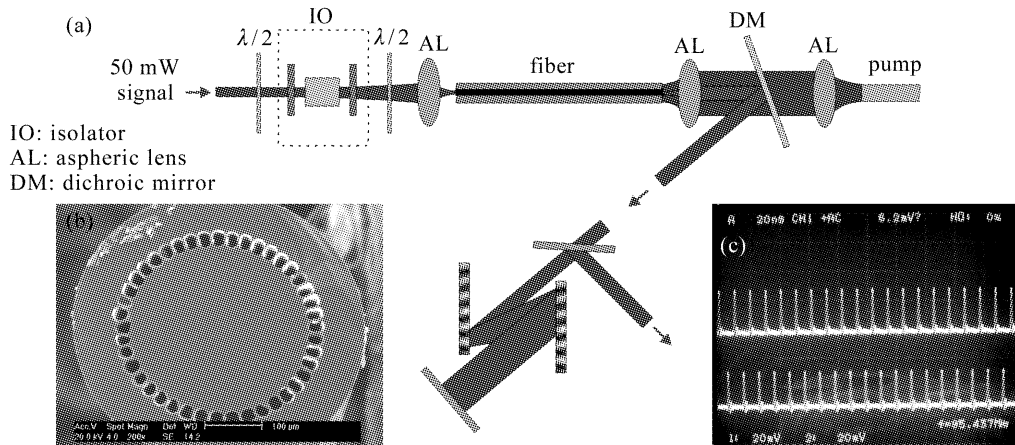


图 4

(a) 光子晶体光纤激光放大系统装置图;(b) 国产掺 Yb 大模面积光子晶体光纤端面图;
(c) 放大器输入信号光和输出信号光脉冲的脉冲序列

Fig. 4

(a) setup of fiber amplifier; (b) SEM of a localization large-mode-area fiber; (c) pulse train of signal pulses and the amplified pulses

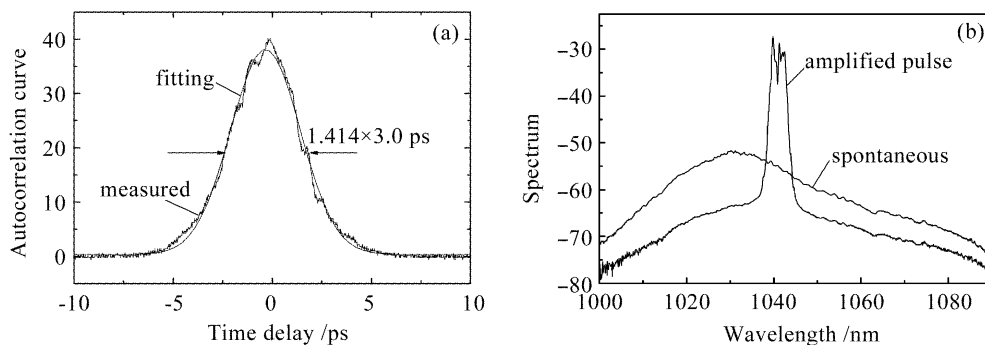


图 5 光纤激光放大系统输出的放大脉冲,时域(a)和频域(b)曲线,

(b)中分别为输入信号脉冲和未输入信号脉冲时的光谱曲线

Fig. 5 Time domain (a) and frequency domain (b) curves of the amplifier pulses,

(b) include the spectra of amplified pulses and spontaneous light

同时也开展了光子晶体光纤飞秒激光放大系统的研究,并在国产双包层大模面积光纤中实现了超短脉冲的放大。实验装置如图 4(a)所示,实验采用

的是后向抽运方式,抽运源由直径 200 μm 光纤耦合输出(JOLD-30-FC-12, German),数值孔径为 0.22,最大输出功率为 30 W。所用增益光纤长度为 1.5 m,

由武汉邮电研究院拉制,其截面如图 4(b)所示。光纤的增益纤芯直径为 $35\ \mu\text{m}$,纤芯掺杂浓度为 0.004。内包层直径为 $315\ \mu\text{m}$,外包层为单层支撑壁空气孔,这种结构可以使内包层获得更高的数值孔径,从而增加抽运光的耦合效率。光纤直径(不包括涂覆层)为 $520\ \mu\text{m}$ 。种子源为采用可饱和吸收镜锁模的新型 Yb:GdYAB 晶体自倍频锁模激光器,将宽度为 2.3 ps,功率为 50 mW 的锁模脉冲信号输入光纤中,在 11.2 W 抽运光的作用下,获得了最高 2.41 W,脉宽为 3.0 ps 的超短脉冲信号。输出放大脉冲的时域、频域特征如图 5 所示。

3 后续研究

在上述实验基础上,我们正在进行单一偏振结构的大模面积光子晶体光纤振荡级和放大级的一体化实验以及通过中空光子带隙光纤的脉冲压缩实验,进而利用这种高平均功率输出的飞秒光纤激光系统进行非线性光学实验来获得高功率输出的频率变换和超连续光谱的产生,相应的系统实验结果将

在随后的论文中报道。

参 考 文 献

- 1 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):57~66
王清月,胡明列,柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):57~66
- 2 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1119~1120
周军,楼祺洪,朱健强等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1119~1120
- 3 L. Li, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. High power low-order modes operation of a multimode fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4):221~222
- 4 F. Röser, J. Rothhard, B. Ortac *et al.*. 131 W 220 fs fiber laser system [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20):2754~2756
- 5 A. Isomäki, O. G. Okhotnikov. Femtosecond soliton mode-locked laser based on ytterbium-doped photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20):9238~9243
- 6 B. Ortac, J. Limpert, A. Tünnermann. High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15):2149~2151