

高功率掺镱大模面积光子晶体光纤 飞秒激光放大器的实验研究*

掺稀土光纤可由激光二极管(LD)直接抽运,大幅度降低成本;宽的增益光谱、高的单程增益和极强的散热能力使之成为理想的激光增益介质;而且光纤激光器将激光限制在光纤波导中传输,具有很好的环境稳定性,以及更加紧凑的结构,特别是双包层光纤激光器的出现,使其成为能够走出实验室的高功率超短脉冲激光器的希望。但是单模光纤固有的小纤芯结构,在传输高功率飞秒脉冲激光时将积累很大的非线性相移,在光纤色散的作用下会导致脉冲畸变,而且高功率密度容易破坏纤芯。所以长期以来,飞秒光纤激光器输出的单脉冲能量、平均功率等技术指标无法与传统固体激光器相比,这大大限制了这种激光器在工业和科研等诸多领域的应用范围。光子晶体光纤具有大模场面积能够极大地降低非线性效应,而增大的数值孔径结构又能够极大地提高抽运耦合效率,这两种优点体现在双包层结构的大模面积光子晶体光纤中,已被用于超短脉冲放大器的研究。最近我们利用偏振型大模面积光子晶体光纤实现了高脉冲能量输出的光子晶体光纤飞秒激光振荡器,紧接着利用这种光纤又实现了飞秒光纤激光振荡器和放大器的一体化。

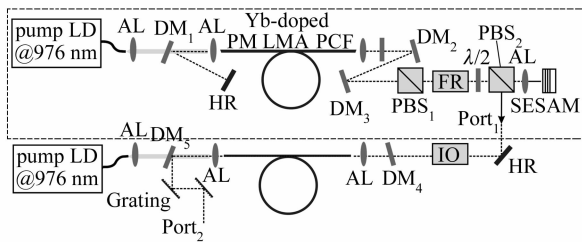


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experiment setup

实验装置如图 1 所示,其中,AL 为非球面镜,DM 为双色镜,PBS 偏振分束器,FR 为法拉第旋光器,HR 为全反镜,SESAM 为半导体可饱和吸收镜。框图中为高脉冲能量输出的光子晶体光纤飞秒激光振荡器,由于腔内不使用色散补偿原件,直接输出具有很大正啁啾的皮秒量级脉冲(5.1 ps),脉冲自相关曲线如图 2 所示。隔离器(IO)隔离从放大器中反馈回来的激光,避免影响锁模的稳定。放大

器采用后向抽运方式,抽运源为中心波长 976nm 的激光二极管(抽运振荡器和放大器的激光二极管最大功率分别为 30 W 和 50 W),200 μm 芯径光纤输出,抽运光和信号光分别通过非球面镜耦合到大模面积光子晶体光纤中。图 1 中 DM₁ 对 976 nm 波段高反,隔离残余抽运光,防止其进入振荡级,而 DM₃ 则是对 976 nm 波段高透,对 1040 nm 波段高反,将信号光反射输出。放大后的光脉冲使用 1200 line/mm 的光栅对进行压缩。实验中所用的掺 Yb³⁺ 双包层大模场面积偏振光子晶体光纤(Crystal Fibre A/S, 丹麦)的端面如图 2 中插图所示。纤芯的单模场直径为 29 μm(对应的单模场面积为 660 μm²),数值孔径为 0.03,内包层直径 200 μm,具有六角型周期性排布的空气孔。作为抽运纤芯的内包层之外环绕着一层“空气包层”,其相邻空气孔之间支撑臂厚度为几百纳米量级,使内包层获得高达 0.55 的数值孔径,这种抽运结构使得增益光纤具有 9 dB/m 的抽运光吸收系数。通过在光纤内包层引入应力双折射材料,可以构成保偏结构。该结构引起的双折射足以使基模的两个简并的正交偏振态分离,从而使其中一个偏振态的折射率低于内包层等效折射率而不满足光纤内传输的弱导条件被损耗掉,确保光纤仅支持单偏振模式的传导。实验中选用光纤的偏振消光比大于 10 dB,波长 1060 nm 附近的单偏振带宽大于 100 nm。光纤两端都进行塌陷并打磨成 8°角,用以防止自激振荡激光的产生。

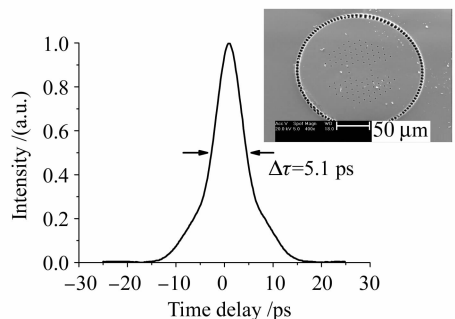


图 2 信号光自相关曲线,插图为大模面积光纤端面图

Fig. 2 Autocorrelation trace of pulse from oscillator, the inset is the cross section of the LMA PCF

* 国家 973 计划(2003CB314904,2006CB806002),国家 863 计划(2007AA03Z447),国家自然科学基金(60678012),高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083,20070056073)和教育部新世纪人才计划(NCET-07-0597)资助项目。

振荡器利用 SESAM 实现正色散锁模,输出平均功率最高能达 2.5 W,为防止功率过高破坏放大器增益光纤入射端面,放大实验中振荡器输出的种子光功率为 1 W 左右。输出信号光经隔离器后平均功率为 780 mW,重复频率 50 MHz,单脉冲能量 15.6 nJ,峰值功率 3.1 kW,中心波长 1045 nm,脉冲宽度 5.1 ps(能够压缩到 800 fs),其时域谱域如图 3 (a) 所示。放大系统采用后向抽运方式,抽运源为最高功率 50 W 的尾纤输出激光二极管,增益光纤选用同样的掺 Yb³⁺ 保偏大模面积光子晶体光纤,以方便

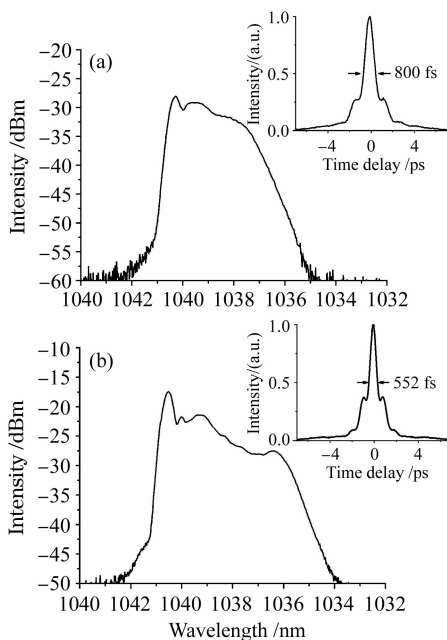


图 3 信号光(a)和放大(b)之后激光的频域和压缩后的时域自相关曲线

Fig. 3 Spectra and Autocorrelation trace after compression of signal laser (a) and amplified laser (b)

进一步的集成化。光纤长度使用 3.5 m,较长的光纤是为了充分利用光纤的非线性进行自相位调制展宽光谱,以便获得更短的飞秒激光脉冲。图 3(b)为 14 W 功率情况下的输出脉冲的时域光谱图,可见放大之后的激光光谱宽度明显变宽,经过压缩获得了 552 fs 飞秒激光脉冲。

受到抽运激光二极管最大输出功率的限制,抽运光用到 42 W,此时输出的放大激光为 14 W,斜率效率为 33%,输出功率特性曲线如图 4 所示。在重复频率保持 50 MHz 的情况下,对应单脉冲能量达到 280 nJ。相信经过进一步提高耦合效率,系统控制入射脉冲功率和抽运功率之间的关系,并使用更大功率的抽运激光二极管,定能获得更高平均功率、更短脉冲宽度的飞秒激光。

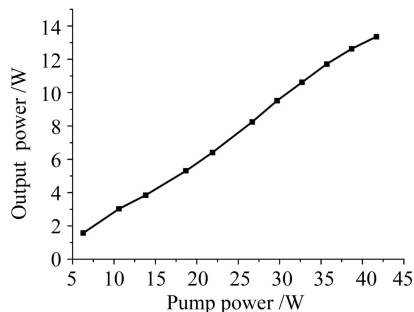


图 4 输出功率特性

Fig. 4 Output power characteristics

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
刘博文 胡明列 宋有建 柴路 王清月
收稿日期:2008-01-30;
收到修改稿日期:2008-02-25