

飞秒激光刻写 FBG 实现 5 kW 近单模光纤振荡器

高功率光纤振荡器具有结构简单、抗回光能力强、成本相对较低等特点,被广泛应用于工业加工领域。光纤布拉格光栅(FBG)是全光纤结构振荡器中不可或缺的器件,扮演着腔镜的角色。目前,工业用的 FBG 主要通过紫外曝光法制备,光纤需要预先载氢,刻写完成后需要进行退火处理,这些都增加了 FBG 的制备时间,且对 FBG 的性能会造成一定的影响。利用飞秒激光刻写 FBG 可有效解决这些问题。2019 年,德国耶拿大学利用飞秒激光刻写的 FBG 实现了 1.9 kW 的光纤振荡器,随后在 2020 年将功率提升至 5 kW。国内开展飞秒激光刻写高功率 FBG 的单位较少,目前还没有公开报道的 kW 级结果。

本课题组搭建了飞秒激光相位模板刻写系统,通过控制光斑的移动扫描来刻写 FBG,相比于耶拿

大学刻写系统通过光纤和相位模板位移来实现刻写的方式,本系统具有更好的稳定性。此外,我们采用的是 515 nm 的可见飞秒激光,相对耶拿大学的 800 nm 的飞秒激光,刻写更加方便。利用该系统我们刻写了波长匹配的 FBG 对,搭建了图 1(a)所示的光纤振荡器。振荡器采用双向泵浦的方式,泵浦光通过两个 $(6+1) \times 1$ 合束器进入谐振腔,泵浦臂所用光纤的纤芯/内包层直径为 $220 \mu\text{m} / 242 \mu\text{m}$,信号臂的纤芯/内包层直径为 $20 \mu\text{m} / 400 \mu\text{m}$,每个泵源的最高输出功率约为 900 W,前向合束器使用了两个泵浦臂,后向合束器使用了 6 个泵浦臂。所用的掺镱光纤(YDF)的纤芯/内包层直径为 $20 \mu\text{m} / 400 \mu\text{m}$,长度约为 19 m。FBG 被刻写在 $20 \mu\text{m} / 400 \mu\text{m}$ 双包层光纤上,并被熔接于两个合束器的外侧。FBG 对的反射谱如图 1(b)所示,高反 FBG(HR-

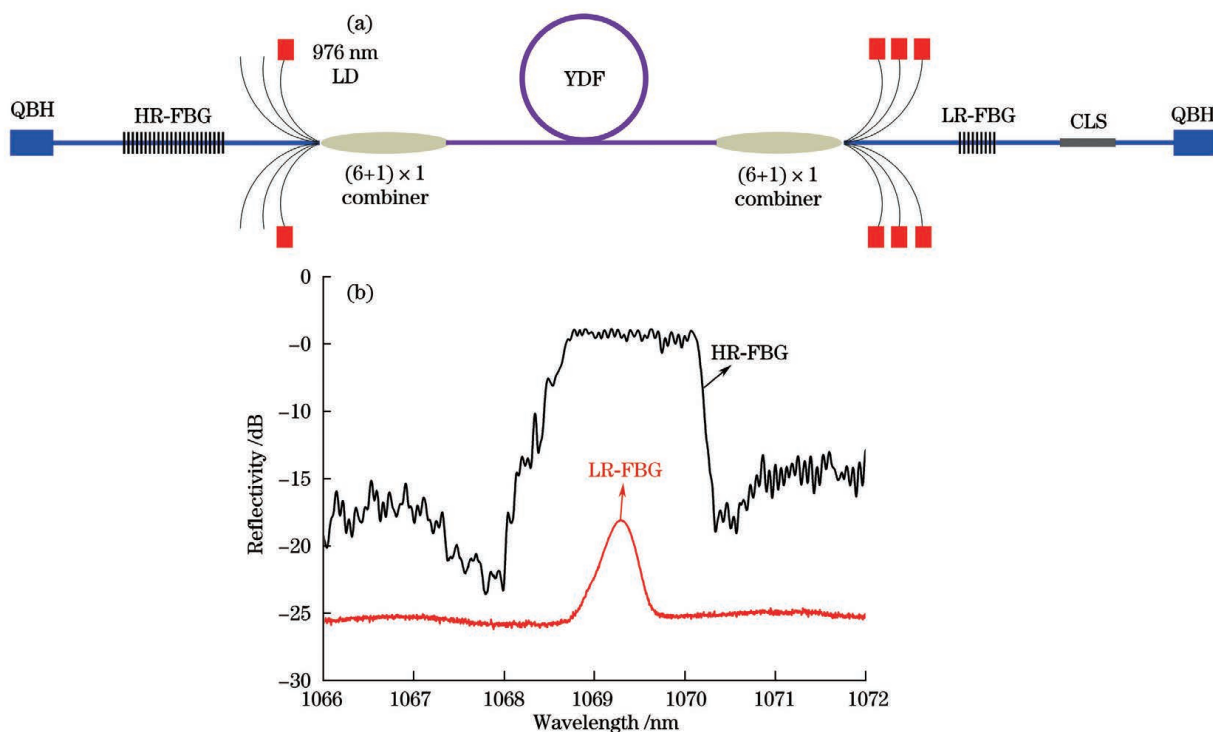


图 1 实验所用的振荡器和 FBG 对的反射谱。(a) 5 kW 振荡器结构示意图;(b) FBG 对的反射谱

Fig. 1 Experimental oscillator and reflection spectra of FBG pairs. (a) Schematic of 5 kW oscillator; (b) reflection spectra of FBG pairs

FBG)的中心波长为~1069.4 nm,带宽为~1.6 nm,反射率高于 99%;低反 FBG(LR-FBG)的中心波长为~1069.3 nm,带宽为~0.3 nm,反射率约为 10%,两个光栅直接被贴在水冷板上而未加制冷封装。为了吸收残余泵浦光,在振荡器输出传能光纤上制作了包层模滤除器(CLS),振荡器的两侧都熔接了石英端帽(QBH),以抑制端面反射。

在实验过程中,先加后向泵浦功率,然后加前向泵浦功率。当后向泵浦光的最大功率为 5551 W 时,振荡器的输出功率为 4528 W,然后增加前向泵浦功率 600 W,实现了 5027 W 的振荡器功率输出,振荡器的斜率效率为 82.1%,如图 2(a)所示。当振荡器的输出功率为 4528 W 时,光束质量因子(M^2)

为 1.5,当输出功率为 5027 W 时, M^2 为 1.6。图 2(b)为不同输出功率下所对应的激光光谱。可以看出,随着激光功率的提升,光谱会因为自相位调制等各种非线性效应而展宽,当输出功率为 5027 W 时,光谱的半峰全宽(FWHM)为~7.1 nm,当输出功率为 3005 W 时,开始出现 Raman 光,在最高输出功率下,Raman 光的强度比激光强度低 18 dB。HR-FBG 与 LR-FBG 的温升系数分别为 2 °C/kW 和 1 °C/kW,相比于耶拿大学有一定的提升。在实验中未发生模式不稳定效应,限制激光进一步提升的因素为受激拉曼效应,利用飞秒激光在更粗芯径的双包层光纤中刻写 FBG,有望进一步提升振荡器的输出功率。

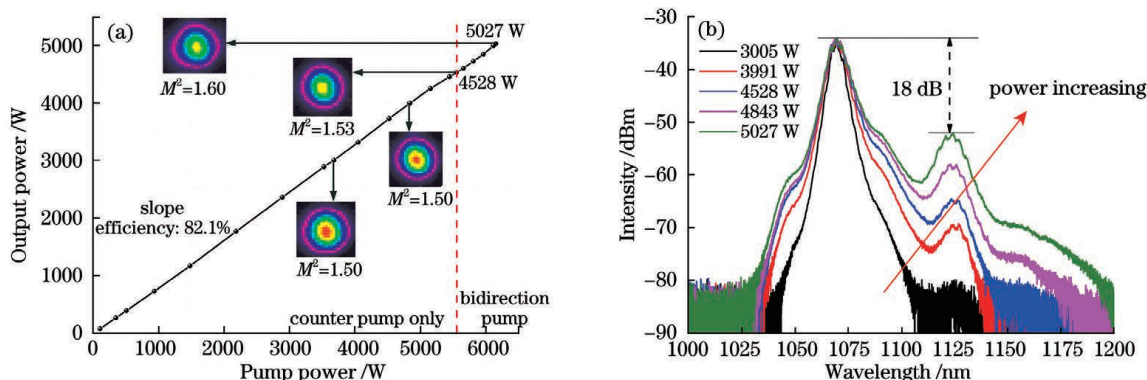


图 2 实验结果。(a)振荡器输出功率随泵浦功率的变化(插图不同输出功率所对应的光斑);(b)振荡器在不同输出功率下的激光光谱

Fig. 2 Experimental results. (a) Output power of oscillator versus pump power with light spots under different output powers shown in insets; (b) spectra of oscillator under different output powers

李宏业^{1,2}, 田鑫^{1,2}, 李昊^{1,2}, 武柏屹^{1,2,3}, 赵晓帆^{1,3}, 王蒙^{1,2,3*}, 高晨晖^{1,3}, 饶斌裕^{1,3},
王崇伟^{1,3}, 奚小明^{1,2,3}, 王泽锋^{1,2,3**}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

通信作者: *gfkdy@163.com; **zefengwang_nudt@163.com

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2021-12-08; 录用日期: 2021-12-14