

### 光纤光栅对的参数匹配与激光输出特性

刘家兴 刘侠 钟守东 王健强 张大鹏 王兴龙

### Fiber gratings matching and output characteristics of fiber laser

Liu Jia-Xing Liu Xia Zhong Shou-Dong Wang Jian-Qiang Zhang Da-Peng Wang Xing-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 114205 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190178

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190178>

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

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

高斯切趾型光纤布拉格光栅外腔半导体激光器的混沌输出特性

Characteristics of chaotic output from a Gaussian apodized fiber Bragg grating external-cavity semiconductor laser

物理学报. 2017, 66(24): 244207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.244207>

基于耗散孤子种子的啁啾脉冲光纤放大系统输出特性

Output pulse compressibility of the chirped pulse fiber amplification based on the dissipative solitons

物理学报. 2016, 65(8): 084203 <https://doi.org/10.7498/aps.65.084203>

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 <https://doi.org/10.7498/aps.64.164204>

国产光纤实现同带抽运3000 W激光输出

3000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber

物理学报. 2018, 67(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171676>

342W全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器

342 W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser

物理学报. 2016, 65(19): 194209 <https://doi.org/10.7498/aps.65.194209>

基于增益光纤长度优化的双波长运转掺铒光纤锁模激光器

Dual-wavelength mode-locked Er-doped fiber laser based on optimizing gain fiber length

物理学报. 2017, 66(13): 134203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.134203>

# 光纤光栅对的参数匹配与激光输出特性

刘家兴<sup>1)2)†</sup> 刘侠<sup>2)</sup> 钟守东<sup>2)</sup> 王健强<sup>2)</sup> 张大鹏<sup>2)</sup> 王兴龙<sup>2)</sup>

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2) (珠海光库科技股份有限公司, 珠海 519080)

(2019年1月30日收到; 2019年2月28日收到修改稿)

高功率光纤激光器的激光输出特性优化, 对进一步提高光纤激光器的输出功率以及实际应用中的切割、加工质量具有重要意义. 斜率效率、背向漏光以及受激拉曼散射是高功率光纤激光器设计中较为关心的输出特性参数. 作为核心器件, 光纤光栅对的参数设计与匹配, 会直接影响到整个激光系统的性能. 本文旨在探究光纤光栅对的参数匹配对激光输出特性的影响, 先是通过理论分析分别阐述了斜率效率、背向漏光以及受激拉曼散射的来源与相互关系; 然后通过实验设计, 采取了两组不同参数光纤光栅对组合, 从实验上分别探究了低反光栅的光谱带宽以及反射率对激光输出特性的影响. 最后得出了光纤光栅对的优化参数与匹配原则, 为提高连续光纤激光器的激光输出特性提供了理论支持与参考价值.

**关键词:** 光纤激光器, 光纤光栅, 受激拉曼散射, 光纤器件

**PACS:** 42.55.Wd, 42.79.Dj, 42.65.Dr, 42.81.Wg

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190178

## 1 引言

激光自问世至今, 得益于其优异的特性, 已经广泛应用于科研、军事、工业、医疗等各个领域<sup>[1,2]</sup>. 其中光纤激光器具有紧凑性好、稳定性高、成本低的特点, 近年来发展迅猛. 特别是在工业加工切割领域, 高功率光纤激光器大放异彩, 使得加工质量与效率明显提高<sup>[3-6]</sup>. 随着工业加工的需求越来越大, 光纤激光器的输出功率也在不断突破, 从数百瓦到上千瓦, 再到数千瓦乃至现在的万瓦级别, 为工业加工提供了更为锋利的工具<sup>[7-13]</sup>.

局限于光纤的非线性效应, 光纤器件的水平以及激光器的设计等, 光纤激光器输出功率的进一步提高越发困难. 从激光器系统设计的角度, 激光器的斜率效率、背向漏光以及受激拉曼散射在高功率光纤激光器中尤为重要, 这些参数的最优化从一定意义上决定了激光器最终的输出功率. 从单元器件角度, 光纤光栅对作为光纤激光器中的关键器件,

为激光的振荡提供了谐振腔, 起到了核心的作用. 光纤光栅对的参数设计与匹配, 会直接影响到整个激光系统的性能.

由于抽运光光子和激光光子间的量子亏损, 光纤激光器中的斜率效率不可能达到 100%, 通常的连续光纤激光器效率低于 80%<sup>[14,15]</sup>, 其中损耗的能量绝大部分都以热量的形式耗散, 因此热管理技术在激光器的设计中至关重要, 散热处理从一定意义上可以决定一台激光器的功率水平. 从源头上考虑, 提高斜率效率意味着热量来源的减少, 同等抽运功率下输出的激光功率也随之增加.

通常谐振腔内振荡的激光受限于光纤光栅的光谱宽度. 一方面, 高反光栅的反射率不可能达到全反射, 常用的反射率一般大于 99%<sup>[16]</sup>, 因此会存在不到 1% 的背向漏光; 另一方面, 随着振荡激光功率的上升, 光纤的非线性效应会使振荡激光的光谱逐渐展宽, 当振荡激光的光谱宽度超过高反光栅的光谱宽度时, 超出的部分也会以背向漏光的形式出现, 而且功率相对较大. 现有的光纤激光器方案

† 通信作者. E-mail: [ericliu@fiber-resources.com](mailto:ericliu@fiber-resources.com)

中 [7-9,17,18], 抽运激光会经过光纤光栅后注入谐振腔内, 腔内的背向漏光不可避免会有一部分通过抽运光合束器反馈到各个抽运源中, 功率越大, 损坏抽运源的风险越高.

受激拉曼散射是指高强度的激光和物质分子发生强烈的相互作用, 使散射过程具有受激发射的性质, 这种散射光是拉曼散射光, 该光学效应称受激拉曼散射 [19-21]. 受激拉曼散射表现出阈值特性, 是一种三阶非线性效应, 当信号激光功率密度达到一定强度时, 信号光的光子与介质声子间的相互作用, 出现受激拉曼散射峰, 图 1 所示为受激拉曼散射过程的能级示意图. 受激拉曼散射具有高强度性和好的方向性, 它的强度可以达到与入射激光相当, 并且发散角接近, 因此在高功率光纤激光器中, 受激拉曼散射的出现严重影响着激光功率的进一步上升, 甚至会导致激光功率的衰减. 拉曼增益系数是描述受激拉曼散射最为重要的参数, 它与激发光 (即本文中的信号激光) 和受激拉曼散射光的频率差相关. 图 2 为当信号光波长为  $1 \mu\text{m}$  附近时, 熔融石英的归一化拉曼增益系数  $g_R$  与频率差  $\Omega$  的关系曲线 (取信号光与受激拉曼散射光的偏振相同) [19]. 从拉曼增益谱中可看到, 石英光纤在频率偏移为 13 THz 附近有一个最强峰, 这是由石英玻璃材料本身的非晶体特性决定的. 实际上, 受激拉曼散射是从产生于整个光纤长度上的自发拉曼散射建立起来的, 如果将整个光纤长度分割为许多微小的长度单位, 那么每个单位长度的受激拉曼散射强度都满足如下关系:

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s, \quad (1)$$

其中  $I_s$  为受激拉曼散射光 (斯托克斯光) 的光强,  $I_p$  为抽运光强 (即文中的信号光强),  $\alpha_s$  为受激拉

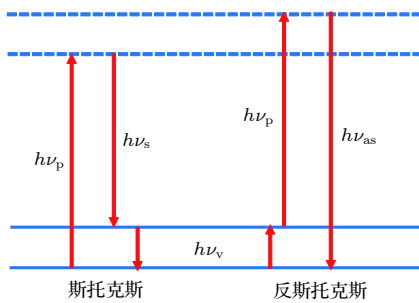


图 1 受激拉曼散射过程能级示意图

Fig. 1. Energy level of the stimulated Raman scattering process.

曼散射光在光纤中的损耗系数. 从 (1) 式可知, 随着抽运光和受激拉曼散射光的增强, 所产生的受激拉曼散射光会进一步增强. 也就是随着信号光在光纤中的传输, 受激拉曼散射光会不断增强, 且增强的速度随着自身强度与信号光强度的增加而增加. 光纤长度越长, 受激拉曼散射光强的总强度也越强.

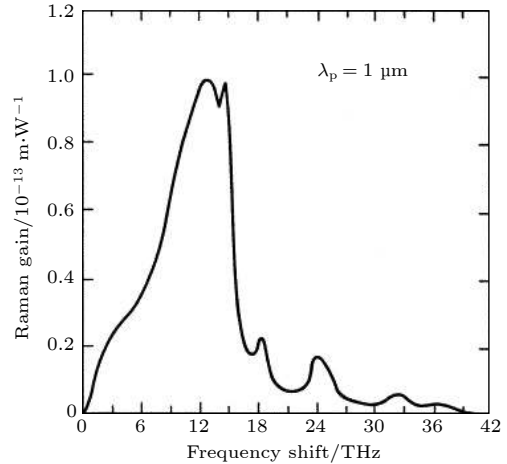


图 2 当信号光与受激拉曼散射光同偏振时, 熔融石英在波长为  $1 \mu\text{m}$  附近的归一化拉曼增益曲线

Fig. 2. Raman-gain spectrum for fused silica at the pump wavelength of  $1 \mu\text{m}$ .

当在光纤中输出的受激拉曼散射光功率与信号光功率相等时, 把此刻信号光的功率定义为受激拉曼散射阈值  $P_0^{\text{cr}}$ , 假设拉曼增益谱为洛伦兹线形, 满足如下关系:

$$\frac{g_R P_0^{\text{cr}} L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} \approx 16, \quad (2)$$

其中  $L_{\text{eff}}$  为有效光纤长度,  $A_{\text{eff}}$  为有效模场面积.

$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p, \quad (3)$$

其中  $L$  为光纤长度,  $\alpha_p$  为光纤对抽运光的损耗系数.

从 (2) 式可知, 拉曼增益系数越大, 有效光纤长度越长、有效模场面积越小, 受激拉曼散射阈值也就越低.

图 3 为常用光纤激光器的光路结构简图, 光纤光栅对提供了谐振腔, 有源光纤吸收了抽运光, 自发辐射荧光中的一部分通过高反光栅 (HR) 和低反光栅 (OC) 的反射得到反馈而形成振荡. 振荡初期, 由于 OC 的反射带宽较窄, 仅在 OC 反射带宽内的激光得以在腔内振荡放大, 得到激光输出, 此时输出激光的光谱与 OC 光谱一致; 随着功率的上

升, 光纤的非线性效应使得激光的光谱逐渐展宽, 输出激光的光谱也逐渐展宽; 在高功率的情况下, 由于较高的激光强度, 光纤中的受激拉曼散射出现并逐步增强; 同时, 展宽后的激光光谱超过 HR 的部分会从 HR 中泄露. 受激拉曼散射与背向漏光都会对激光器的斜效率造成影响. 因此, 在高功率的光纤激光器中, 输出激光的斜率效率、受激拉曼散射、HR 背向漏光就成为了限制功率进一步增长的重要因素, 如果能得到最优参数的输出激光, 也就意味着所能达到的功率越大化.



图 3 光纤激光器光路简图  
Fig. 3. Diagram of fiber laser.

目前工业领域常用的高功率连续光纤激光器中, 波长通常为 1080 nm 附近, HR 光纤光栅的带宽最普遍的为 2 nm, 反射率要求 99% 以上; OC 的参数范围较大, 反射率在 4%—15% 之间. 从上述分析中可知, OC 的参数对激光的振荡与输出影响更为直接. 此前的研究也发现, 光纤激光器中 OC 的参数对受激拉曼散射的强度影响较大, 但是对斜率效率与背向漏光的研究不多 [14,22,23]. 只追求单方面的优化往往会对其他方面的参数造成恶化, 例如光谱越宽的输出光谱能够有效降低受激拉曼散射的强度, 但是过宽的光谱可能会导致背向漏光的急剧上升, 限制了激光功率的提高. 本文主要采用不同参数的 OC 光栅进行匹配研究, 针对斜率效率、背向漏光和受激拉曼散射等关键参数, 得到光纤光栅对的参数匹配对激光输出特性的影响. 最后综合评估与平衡, 优化光纤光栅对的参数, 为提高

光纤激光器输出功率及输出参数质量提供了参考. 此外, 在光纤光栅样品的选取上, 以工业应用的光纤激光器中最为普遍使用的参数为基础, 旨在使得研究结论更具实践意义.

## 2 实验设计

图 4 为实验光路图, 为我们自行搭建的高功率连续光纤激光器, 其中有源光纤对波长为 915 nm 抽运光的吸收系数为 0.4 dB/m, 纤芯大小 20  $\mu\text{m}$ , 包层大小为 400  $\mu\text{m}$  (Nufern, LMA-YDF-20/400-M), 为了保证对抽运光的充分吸收, 选用有源光纤的长度为 40 m, 激光输出最佳的斜率效率可在 70% 以上. 无源光纤尺寸参数与有源光纤一致. 无源器件全部来源于珠海光库科技股份有限公司 (AFR), 其中包括抽运光合束器 (HPPC-(18+1)x 1-22-20-20)、光纤光栅 (HPCG-P1500-1080-2-1)、包层光滤除器 (CPS-915-SSSS-SS-200-8-Q)、输出准直器 (Dragon-2-1080-020-15-16-S) 等. 抽运源为一组 105/125  $\mu\text{m}$  输出光纤的光纤耦合半导体激光器 (BWT), 最高可提供功率共计 1400 W、波长为 915 nm 的抽运光. 从上文的理论分析可知, 更长的光纤可以有效提高总的受激拉曼散射功率, 为了使得受激拉曼散射效应更为明显, 我们在谐振腔内熔接了两段长度为 3 m 的无源光纤以增加光纤长度, 以便在实验中更容易对比不同条件下的受激拉曼散射差异. 但从激光输出斜率效率看, 光纤长度的增加以及额外的熔接点, 使得激光腔的损耗更大, 导致实验中所搭建的激光器效率有所降低. 激光通过准直器输出后, 再经过玻璃片分光 (分光比为 98:2) 分别由功率计 PM1 (Ophir, 5000 W-BB-50-

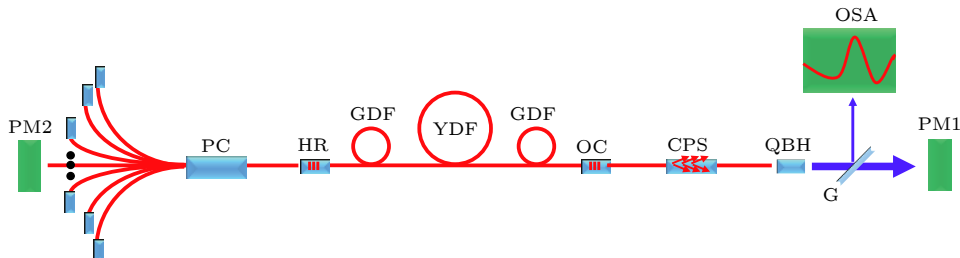


图 4 高功率连续光纤激光器实验光路图 PC, 抽运光合束器; HR, 高反光纤光栅; OC, 低反光纤光栅; YDF, 有源光纤; GDF, 无源光纤; CPS, 包层光滤除器; QBH, 输出准直头; G, 分光玻璃片; OSA, 光谱分析仪; PM1, PM2, 光功率计

Fig. 4. Diagram of high power continue wave fiber laser in experiment. PC, pump combiner; HR, high reflection fiber grating; OC, low reflection fiber grating; YDF, active fiber; GDF, passive fiber; CPS, cladding power stripper; QBH, quartz block head of a fiber optics cable; G, beam splitter; OSA, spectrum analyzer; PM1 and PM2, power meters.

V1) 和光谱分析仪 OSA(ANDO, AQ6374) 测试输出功率与光谱. 背向漏光经过合束器后由尾部信号光纤输出, 通过功率计 PM2(Ophir, F150A-BB-26) 进行测试, 考虑到合束器以及相关熔接点的插入损耗, 实验中所测得的背向漏光功率比实际偏小, 但并不影响实验结论.

为了探究光栅对参数的匹配对光纤激光器输出特性的影响, 实验选取了两组光栅对样品, 其中每组样品包括一个 HR (AFR ClearCut™ FBG) 和一系列不同参数的 OC (AFR ClearCut™ FBG). 第一组的高反光栅 HR 中心波长为 1080.4 nm, 光谱带宽 (透射谱-13 dB 处) 为 2.0 nm, 反射率为 99% 以上, 透射谱如图 5(a) 所示; OC 光谱带宽 (反射谱的半高全宽) 分别为 0.78, 0.91, 1.0, 1.31 和 1.61 nm, 中心波长和反射率相同, 都为 1080.4 nm 附近以及 10% 附近, 典型反射光谱如

图 5(b) 所示, 为近似平顶型光谱. 第二组样品的高反光栅 HR 中心波长为 1080.4 nm, 光谱带宽为 2.0 nm, 反射率大于 99%, 透射谱如图 6(a) 所示; OC 反射率分别为 2.6%, 5.2%, 10.3% 及 11.6%, 中心波长和光谱带宽相同, 都为 1080.4 nm 附近和 1.0 nm, 他们的典型反射光谱如图 6(b) 所示, 反射光谱中带有尖峰形状.

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 低反光栅光谱带宽对激光输出特性的影响

首先采用第一组 HR 与不同参数 OC 的组合, 探究 OC 光谱带宽对激光输出特性的影响. 分别将不同组合的光栅对接入到光纤激光器系统中, 测试输出功率、背向漏光以及输出光谱特性.

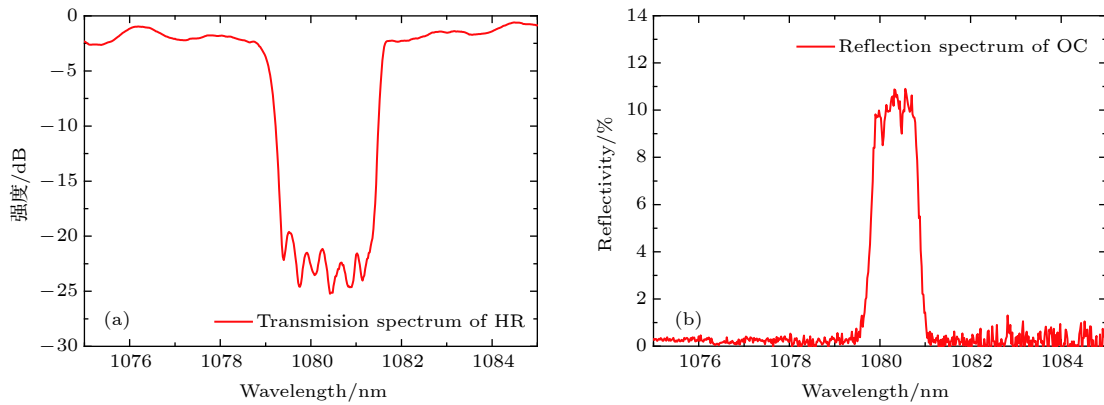


图 5 第一组光纤光栅光谱图 (a) 为高反光栅透射谱; (b) 为低反光栅反射谱

Fig. 5. Spectra of the first group of fiber gratings: (a) Transmission spectrum of the high reflection grating; (b) reflection spectrum of the low reflection grating.

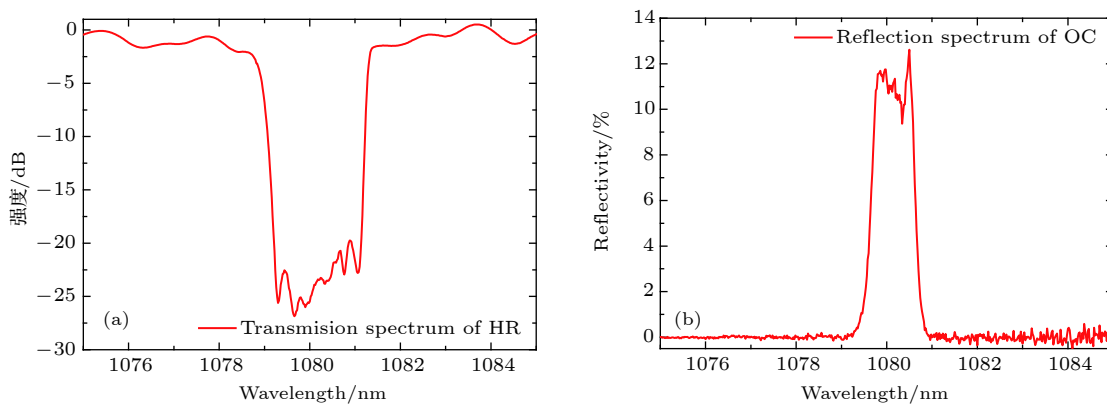


图 6 第二组光纤光栅光谱图 (a) 为高反光栅透射谱; (b) 为低反光栅反射谱

Fig. 6. Spectra of the second group of fiber gratings: (a) Transmission spectrum of the high reflection grating; (b) reflection spectrum of the low reflection grating.

图 7(a) 为不同光谱带宽的 OC 对应的输出功率曲线, 在同样的抽运光注入下, 其中带宽为 0.78 nm 的 OC 输出功率最高, 达 894 W (对应的抽运光功率为 1296 W), 但是不同 OC 输出功率差异较小, 斜率效率的差异小于 1%, 可见本文采用的 OC 光谱带宽差异范围对输出激光的斜率效率影响较小。

图 7(b) 为不同光谱带宽的 OC 对应的背向漏

光功率曲线, 从中可以明显发现, 在同等条件下, 光谱带宽越宽, 背向漏光越强。对于本文中所采用的 HR (光谱带宽为 2.0 nm), 当 OC 的光谱带宽为 0.78 nm 时, 背向漏光最小, 最高为 2.82 W; 随着光谱带宽的增加, 分别为 0.91, 1.0 及 1.31 nm 时, 背向漏光增强, 但是相互之间功率差别不明显; 当光谱带宽增加到 1.63 nm 时, 背向漏光明显增

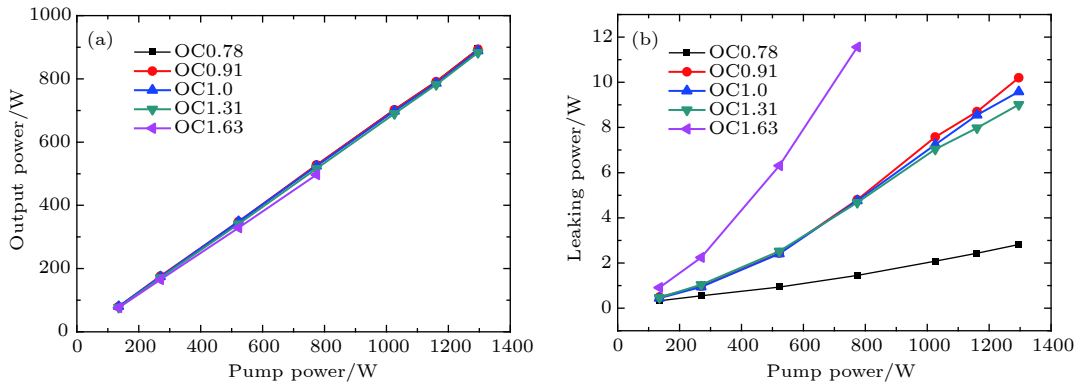


图 7 不同光谱带宽低反光栅激光输出特性 (a) 输出功率曲线; (b) 背向漏光曲线

Fig. 7. Output characteristics of the fiber laser with low reflection gratings of different bandwidth: (a) Output power curve; (b) backward leaked power curve.

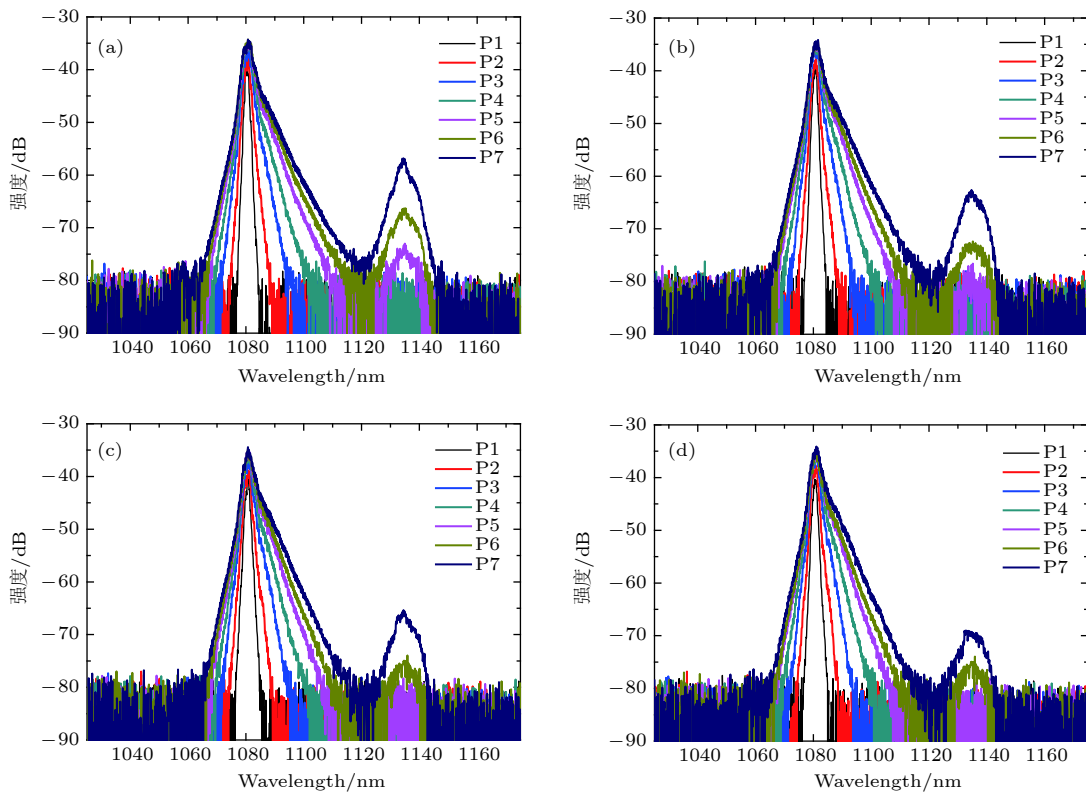


图 8 不同光谱宽度的低反光栅输出光谱特性 (a) 低反光栅光谱宽度为 0.78 nm; (b) 低反光栅光谱宽度为 0.91 nm; (c) 低反光栅光谱宽度为 1.0 nm; (d) 低反光栅光谱宽度为 1.31 nm

Fig. 8. Spectra of output laser with low reflection gratings of different bandwidth: (a) 0.78 nm bandwidth; (b) 0.91 nm bandwidth; (c) 1.0 nm bandwidth; (d) 1.31 nm bandwidth.

强, 在抽运光功率为 774 W 时已经高达 11.6 W, 严重影响激光器的正常运转. 从产生机理上, 背向漏光的主要来源为输出激光光谱展宽后超出 HR 的部分. 当 OC 的光谱带宽较窄时, 输出激光的光谱较窄, 展宽后超出 HR 的部分很小, 因此背向漏光较小; 当 OC 的光谱带宽增加到一定宽度后, 输出激光的光谱较宽, 已经接近 HR 光谱带宽, 随着功率的增加, 光谱不断展宽, 超出 HR 的部分明显增多, 因此背向漏光会急剧增加.

由于光谱带宽为 1.63 nm 的 OC 样品背向漏光过大, 导致无法输出高功率, 因此没有采集其光谱数据. 其他不同组合的输出激光光谱特性如图 8 所示. 随着输出功率的不断增大, 输出激光的光谱逐步展宽, 当输出激光功率在 700 W 附近时, 可以观察到在 1135 nm 附近受激拉曼散射峰出现, 同时受激拉曼散射峰的强度随着输出功率的增加而增强. 对比不同光谱带宽的 OC, 可以明显发现, 光谱带宽较宽的 OC 与 HR 组合, 受激拉曼散射峰出现的阈值功率较高, 且在同样的输出功率下, 激光输出峰与受激拉曼散射峰的对比度较高. 图 9 所示是当激光输出功率为 840 W 时, 不同光谱带宽 OC 的组合对应的光谱特性图, 可以看出, 随着光谱带宽的增加, 受激拉曼散射强度降低, 即对比度提高. 从受激拉曼散射产生的机理分析, 结合上文的理论公式 (1) 式—(3) 式可以知道, 当信号激光的光谱增宽时, 偏移拉曼增益曲线中最大值的部分就增多, 意味着有效拉曼增益减小; 从本文测试的结果看, 信号激光与受激拉曼散射光的频率差在拉曼增益谱 15 THz 附近的尖峰位置处, 该峰值宽度

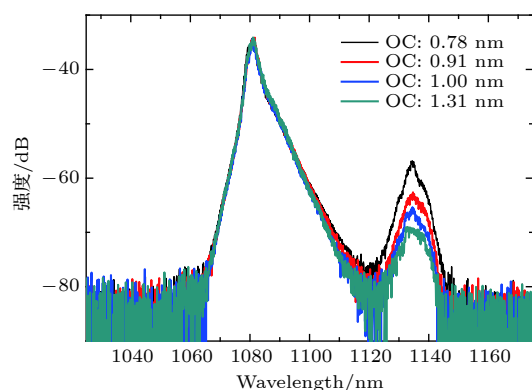


图 9 同等输出功率 (840 W) 下, 不同光谱宽度的低反光栅受激拉曼散射峰对比图

Fig. 9. Stimulated Raman scattering of low reflection gratings with different bandwidth at the output power of 840 W.

较窄 (小于 1 THz), 偏离峰值的部分拉曼增益迅速降低. 因此, 随着 OC 光谱带宽的增加, 振荡激光的带宽增加, 光谱分布更宽, 有效的拉曼增益减小, 因此受激拉曼散射阈值也就更高, 最终同等输出功率下的强度较弱. 综合以上测试结果, 可知 OC 光谱带宽对激光输出特性的影响.

对于输出激光的斜率效率, 结果反映出光谱带宽对斜率效率的影响不明显, 最终激光器输出的功率差异不大. 从背向漏光功率看, 光谱带宽的差异影响较明显, 带宽越宽背向漏光越明显, 具体原因在前文已经分析过. 而对于受激拉曼散射, 恰恰与对背向漏光的影响相反, 更宽的光谱使得受激拉曼散射产生的阈值更高, 从而强度更低, 实验的结果与理论分析相符. 从改变 OC 的光谱带宽角度, 背向漏光与受激拉曼散射为一对矛盾点, 想要获得综合性能高的激光输出特性, 需要根据实际选取合理的 HR 与 OC 的光谱带宽, 以得到较小的背向漏光以及相对低的受激拉曼散射强度. 从本文选取的参数看, 对于光谱带宽为 2.0 nm 的 HR, OC 可以选取 1.0—1.3 nm 带宽的参数进行匹配, 这样在千瓦级光纤激光器中可以得到综合参数较好的激光输出.

### 3.2 低反光栅反射率对激光输出特性的影响

接着采用第二组 HR 与 OC 的组合, 探究 OC 反射率对激光输出特性的影响. 同样地, 分别将不同组合的光栅对接入到光纤激光器系统中, 测试输出功率、背向漏光以及输出光谱特性.

图 10(a) 为不同反射率的 OC 对应的输出功率曲线, 在同样的抽运光注入下, 其中反射率为 5.2% 的 OC 输出功率最高, 反射率为 10.3% 的 OC 输出功率最低, 但是不同 OC 输出功率差异较小, 对应斜率效率的差异也在 1% 附近, 可见本文采用的 OC 的反射率差异范围对输出激光的斜率效率影响较小. 理论上模拟分析<sup>[14,24,25]</sup> 发现存在最优反射率, 从本文结论上看, 在 5% 附近, 我们在后续的工作中将会针对该问题深入模拟分析.

图 10(b) 为不同反射率的 OC 对应的背向漏光功率曲线, 从中可以明显发现, 在同等条件下, 反射率越高, 背向漏光越强. 当 OC 的反射率为 2.6% 时, 背向漏光最小, 最高时为 2.72 W; 随着反射率

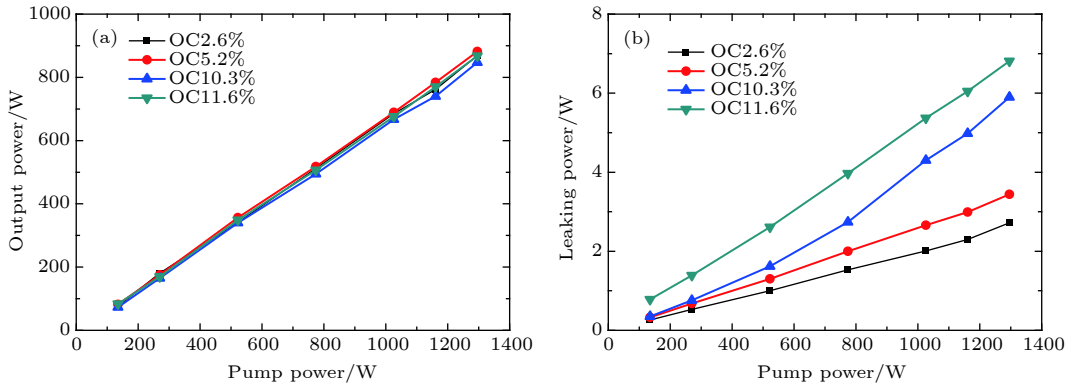


图 10 不同反射率低反光栅激光输出特性 (a) 输出功率曲线; (b) 背向漏光曲线

Fig. 10. Output characteristics of the fiber laser with low reflection gratings of different reflectivity: (a) Output power curve; (b) backward leaked power curve.

的增加, 分别为 5.2%, 10.3% 及 11.6% 时, 背向漏光逐渐增强. 分析产生的原因后, 我们认为该背向漏光的差异主要来源于谐振腔内激光功率的不同. 在输出功率相当的情况下, 当 OC 的反射率较大时, 谐振腔内激光的功率对应较大, 在高反光栅反射率不变的条件下背向漏光则较大; 反之较小.

为了进一步探究背向漏光的产生原因, 我们测试了光谱带宽为 1 nm, 反射率为 10% 附近的 OC 样品在输出功率为 840 W 时所产生的背向漏光光谱, 结果如图 11 所示. 从图中可以看到, 背向漏光的光谱包括信号光部分与受激拉曼散射光部分, 主要功率来源于信号光. 其中, 信号光部分的光谱除了主峰之外, 存在一个相对平坦的光谱, 我们认为该部分平坦光谱的成分主要来源于腔内激光超过 HR 带宽的部分, 而主峰主要来源于 HR 本身的透射率. 因此, 对于同样反射率而不同带宽的 OC 组合, 背向漏光的差异主要来源于光谱展宽; 对于同

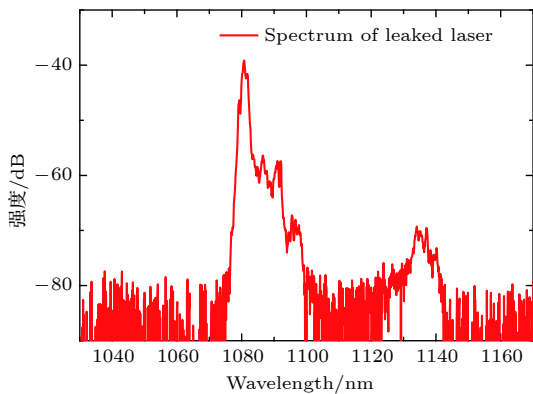


图 11 背向漏光光谱图 (OC: 10%, 1.0 nm)

Fig. 11. Spectrum of the leaked laser with OC of 10% reflectivity and 1.0 nm bandwidth.

样带宽而不同反射率的 OC 组合, 背向漏光的差异则主要来源于 HR 本身的透射率.

同理, 对于不同 OC 反射率组合, 测试了对应的输出激光光谱特性, 结果如图 12 所示. 与第一组的实验类似, 随着输出功率的不断增大, 输出激光的光谱逐步展宽, 且当输出功率在 700 W 附近时, 可以观察到在 1135 nm 附近受激拉曼散射峰的出现, 同时受激拉曼散射峰的强度随着输出功率的增加而提高. 对比不同反射率的 OC 可以发现, 反射率较低的 OC 与 HR 组合, 受激拉曼散射峰的强度稍低, 即对比度稍高, 但是并不明显. 最后在激光输出功率为 840 W 下, 测试了不同反射率 OC 的组合对应的光谱特性图, 结果如图 13 所示, OC 的反射率对受激拉曼散射的影响不敏感, 反射率较低的 OC 相对有优势. 我们认为这种实验结果也符合理论预期, 与背向漏光的结论一样, 主要来源于谐振腔内激光的功率, 而受激拉曼散射的强度与谐振腔内激光的强度密切相关, 因此而对于反射率较低的 OC, 其腔内激光的功率相对低, 同样的输出功率下, 受激拉曼散射的强度也就相对低, 对比度也就越高. 但是对于反射率为 2.6% 的 OC, 我们发现其受激拉曼散射强度并非最低, 具体原因有待进一步分析确认, 我们初步认为存在影响受激拉曼散射产生的其他因素, 例如光栅光谱形状的差异以及其他未知因素等.

为此, 选取另外一支低反光纤光栅, 其反射率为 2.5%, 光谱带宽为 1 nm, 但是具有不同于上述实验 OC 的光谱, 如图 14(a) 所示. 采用该 OC 与上述实验的 HR 进行搭配, 在输出功率同样为 840 W



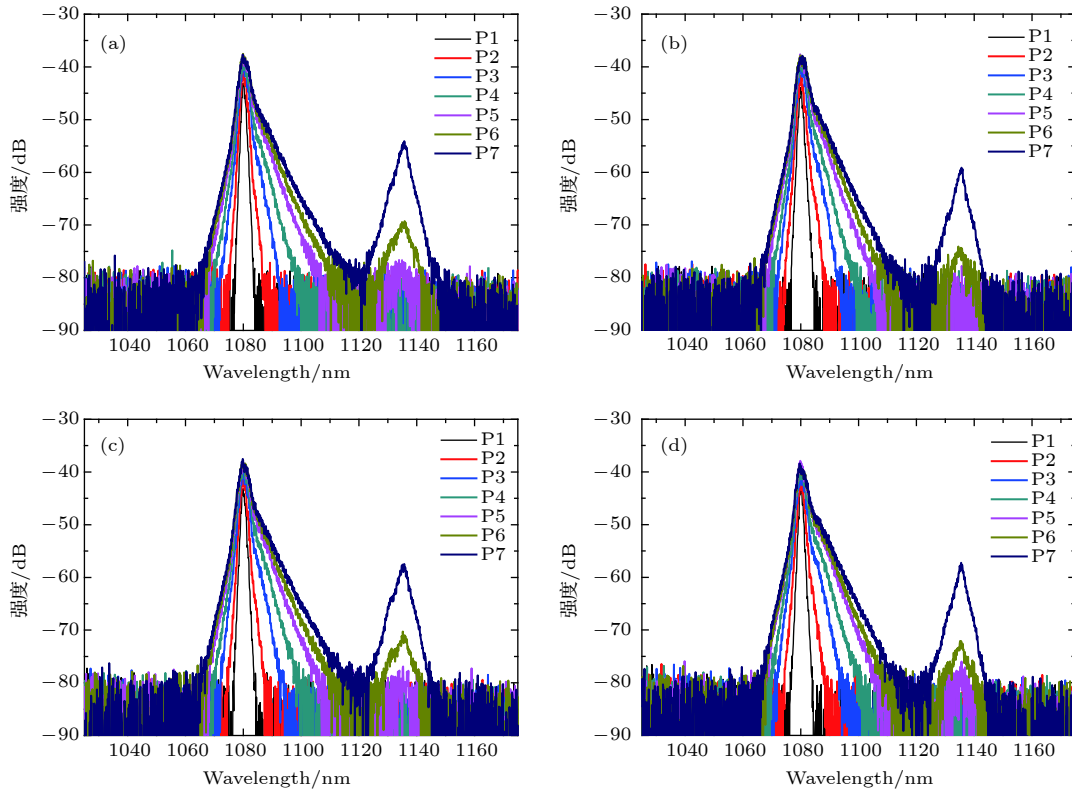


图 12 不同反射率的低反光栅输出光谱特性 (a) 反射率为 2.6%; (b) 反射率为 5.2%; (c) 反射率为 10.3%; (d) 反射率为 11.6%  
 Fig. 12. Spectra of output laser with low reflection gratings of different reflectivity: (a) 2.6%; (b) 5.2%; (c) 10.3%; (d) 11.6%.

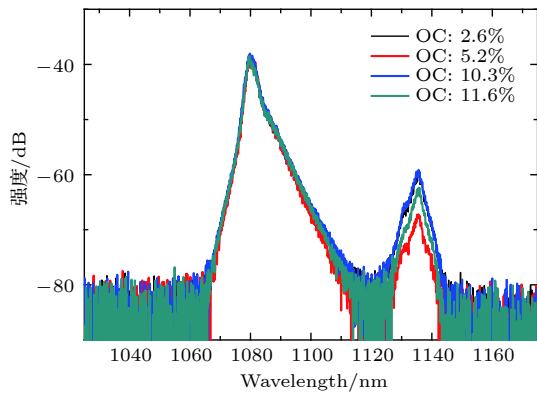


图 13 同等输出功率水平下 (840 W), 不同反射率的低反光栅受激拉曼散射效应对比图  
 Fig. 13. Stimulated Raman scattering of low reflection gratings with different reflectivity at the output power of 840 W.

时, 测试了输出激光的光谱, 结果如图 14(b) 所示. 结果显示, 输出激光的受激拉曼散射强度明显降低. 我们认为, 该结果的差异并非由于反射率与带宽的不同, 而是来源于光栅光谱形状的差异等其他未知因素, 我们将会在后续的工作中深入研究. 综

合以上测试结果可知不同 OC 反射率对于激光输出特性的影响.

对于输出激光的斜率效率, 结果反映, 反射率对斜率效率影响同样不明显, 最终激光器输出的功率差异不大. 从背向漏光功率看, 反射率较高的 OC 背向漏光更明显. 对于受激拉曼散射, 反射率较低的 OC 使得受激拉曼散射强度更低, 但是实验中发现存在影响受激拉曼散射产生的其他因素, 使得反射率最低的光栅组合与趋势不符. 从该组对比实验结果看, 通过降低 OC 的反射率, 可以有效降低背向漏光. 但是过低的反射率会影响激光斜率效率, 当小于最优反射率时效率会出现逐步衰减<sup>[14,24,25]</sup>; 此外, 从光栅制备以及稳定性的角度看, 过低的反射率可能会对 OC 的长期稳定性有所影响, 例如在高温环境中长期运行, 光栅的深度可能会存在逐步减弱的风险<sup>[16,26]</sup>. 因此, 在实际使用中需根据光栅的使用环境以及光纤激光器的工作条件, 采用适当反射率的 OC, 以得到综合性能最优的激光输出特性.

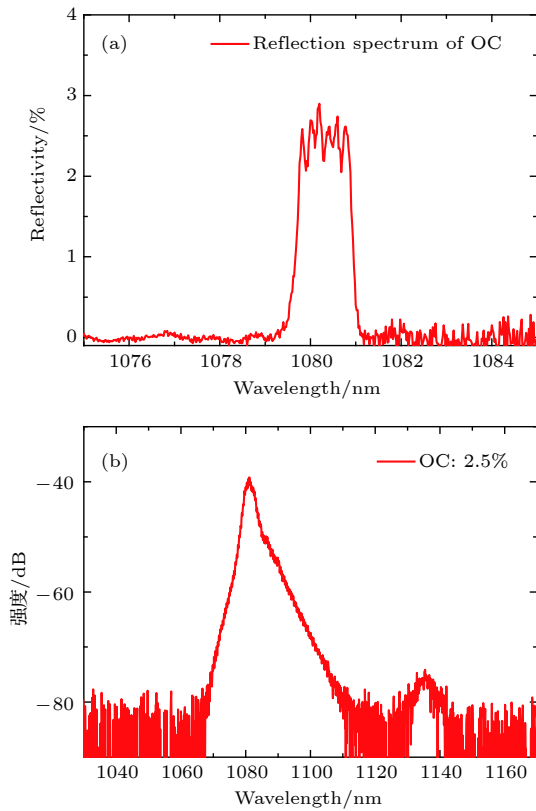


图 14 (a) 反射率为 2.5%, 光谱带宽为 1.0 nm 的 OC 光谱图; (b) 输出功率为 840 W 时的输出激光光谱图

Fig. 14. (a) Reflection spectrum of the OC of 2.5% reflectivity and 1.0 nm bandwidth; (b) spectrum of the output laser at the output power of 840 W.

## 4 总结与展望

斜率效率、背向漏光以及受激拉曼散射是在高功率连续光纤激光器系统中较为关心的输出特性参数. 光纤光栅对作为光纤激光器中的关键器件, 为激光的振荡提供了谐振腔, 起到了核心的作用. 光纤光栅对的参数设计与匹配, 会直接影响到整个激光系统的性能. 本文旨在探究光纤光栅对的参数匹配对激光输出特性的影响, 先是通过理论分析分别阐述了斜率效率、背向漏光以及受激拉曼散射的来源与相互关系; 然后通过实验设计, 采取了两组不同参数光纤光栅对组合, 从实验上分别探究了低反光栅光谱带宽以及反射率对激光输出特性的影响.

在高反光栅参数不变的条件下, 输出激光的斜率效率对低反光栅的光谱带宽与反射率变化并不敏感, 没有表现出明显的变化趋势. 仅考虑背向漏光的特性, 光谱带宽较窄、反射率较低的低反光栅

可以有效降低背向漏光的强度, 从而有效降低对抽运激光的影响, 有利于输出功率的进一步提高与系统的安全性. 但是, 在同等输出功率下, 光谱带宽较窄的低反光栅会导致输出激光的受激拉曼散射强度明显提高, 即对比度明显降低; 而反射率较低的低反光栅虽然对受激拉曼散射强度的降低有好处, 然而过低的反射率会影响激光斜率效率, 当小于最优反射率时效率会出现逐步衰减, 而且过低的反射率存在影响光栅长期稳定性的不利风险. 在后续的工作中, 我们将从理论模拟角度分析最优 OC 反射率的数值, 针对特定激光系统提供更有力的理论设计基础. 综合上述因素的影响, 我们认为在高功率光纤激光器设计时, 在背向漏光功率处于安全范围内时, 建议采用光谱带宽适当较宽的低反光栅, 以及在保证光栅稳定性和激光器斜率效率的基础上选择反射率相对低低反光栅, 这样可以得到综合性能相对好的激光输出.

此外, 在实验中发现, 光纤光栅光谱的形状影响受激拉曼散射的因素之一. 通过对比两组实验结果发现, 光谱形状相对平滑的第一组样品, 在同等激光输出功率的情况下, 受激拉曼散射强度明显比较低. 根据 (1) 式—(3) 式, 光谱形状中若存在尖峰部分, 那么振荡激光的光谱更为集中, 受激拉曼散射增益强的频率成分较高, 受激拉曼散射阈值也就相对低, 总的强度较强; 如果光谱较为平滑, 分布如平顶型, 那么激光的频率成分相对平坦, 受激拉曼散射增益峰值处的频率成分相对较少, 受激拉曼散射阈值也就相对高, 总的强度较弱. 为此本文进行了初步的验证实验, 结果符合预期. 我们相信, 优化光纤光栅对的光谱特性及其相互间的配合, 具备有效降低受激拉曼散射强度的潜在应用. 我们将会在接下来的工作中对该问题进行针对性研究.

高功率光纤激光器的激光输出特性优化, 对进一步提高光纤激光器的输出功率以及实际应用中的切割、加工质量具有重要意义. 本文的研究能为高功率光纤激光器的设计工作提供有效的理论支持与参考.

## 参考文献

- [1] Demtroder W 2009 *Laser Spectroscopy* (3rd Ed.) (Berlin: Springer-Verlag) pp851–892
- [2] Duarte FJ 2009 *Tunable Laser Applications* (2nd Ed.) (Boca Raton: CRC Press) pp1–14
- [3] Hashemzaden M, Suder W, Williams S, Powell J, Kaplan A F H, Voisey K T 2014 *Phys. Procedia* **56** 909

- [4] Zervas M N 2014 *Int. J. Mod. Phys. B* **28** 12
- [5] Zhou H, Chen Z, Zhou X, Hou J, Chen J 2015 *Opt. Commun.* **347** 137
- [6] Holehouse N, Magne J, Auger M, Quebec M 2015 *Proc. SPIE* **9344** 93441F
- [7] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N 2004 *Opt. Express* **12** 25
- [8] IPG Photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser. <http://www.ipgphotonics.com> [2009-6-16]
- [9] NukW: Kilowatt laser amplifier platform <http://www.nufern.com> [2012-4-12]
- [10] Zhou J, Lou Q H, Zhu J Q 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1119 (in Chinese) [周军, 楼祺洪, 朱健强 2006 光学学报 **26** 1119]
- [11] Li C, Yan P, Chen G 2006 *Chinese Journal of Lasers* **33** 738 (in Chinese) [李晨, 闫平, 陈刚 2006 中国激光 **33** 738]
- [12] Li W, Wu Z C, Chen X 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 890 (in Chinese) [李伟, 武子淳, 陈曦 2006 强激光与粒子束 **18** 890]
- [13] Lou Q H, He B, Xue Y H 2009 *Chinese Journal of Lasers* **36** 1277 (in Chinese) [楼祺洪, 何兵, 薛宇豪 2009 中国激光 **36** 1277]
- [14] Ren Y J 2012 *M. S. Thesis* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [任亚杰 2012 硕士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [15] Zhan H, Liu Q Y, Wang Y Y, Ke W W, Ni L, Wang X L, Peng K, Gao C, Li Y W, Lin H H, Wang J J, Jing F, Lin A X 2016 *Opt. Express* **24** 24
- [16] Raman K 2010 *Fiber Bragg Gratings* (2nd Ed.) (USA: Academic Press) pp119–180
- [17] Wang J H, Chen G, Zhang L, Hu J M, Li J Y, He B, Chen J B, Gu X J, Zhou J, Feng Y 2012 *Appl. Opt.* **51** 29
- [18] Xiao H, Leng J Y, Zhang H W, Huang L J, Xu J M, Zhou P 2015 *Appl. Opt.* **54** 27
- [19] Agrawal G P 1995 *Nonlinear Fiber Optics* (USA: Academic Press) p300
- [20] Schreiber T, Liem A, Freier E, Matzdorf C, Eberhardt R, Jauregui C, Limpert J, Tunnermann A 2018 *Proc. SPIE* **8961** 89611T-1
- [21] Tao R M, Xiao H, Zhang H W, Leng J Y, Wang X L, Zhou P, Xu X J 2018 *Opt. Express* **26** 19
- [22] Xu H Y, Jiang M, Shi C, Zhou P, Zhao G M, Gu X J 2017 *Appl. Opt.* **56** 12
- [23] Liem A, Freier E, Matzdorf C, Reichel V, Schreiber T, Eberhardt R, Tunnermann A 2013 *Advanced Solid-State Lasers Congress Technical Digest* Paris, France, October 27–November 1, 2013 JTh2A.32
- [24] Ido K, Amos A H 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 9
- [25] Wang W C, Li L X, Chen D D, Zhang Q Y 2016 *Sci. Rep.* **6** 31761
- [26] Li Y H, Yang M W, Wang D N, Lu J, Sun T, Grattan K T V 2009 *Opt. Express* **17** 22

## Fiber gratings matching and output characteristics of fiber laser

Liu Jia-Xing<sup>1)2)†</sup> Liu Xia<sup>2)</sup> Zhong Shou-Dong<sup>2)</sup> Wang Jian-Qiang<sup>2)</sup>  
Zhang Da-Peng<sup>2)</sup> Wang Xing-Long<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

<sup>2)</sup> (Advanced Fiber Resources (Zhuhai), Ltd., Zhuhai 519080, China)

(Received 30 January 2019; revised manuscript received 28 February 2019)

### Abstract

In order to improve the output power and processing quality in industrial applications, it is important to optimize the output characteristics of the high-power fiber lasers. The slope efficiency, backward leaking power and stimulated Raman scattering are key issues in high-power fiber laser design. The parameters matching the fiber gratings, which are the critical components, have a direct influence on the whole fiber laser system. In this paper, the parameters matching the fiber gratings in fiber lasers are investigated. Firstly, the origin of slope efficiency, backward leaking power and stimulated Raman scattering are analyzed in theory. Then the influences on output characteristics of fiber lasers comprised of the output coupler gratings, which have different bandwidths and reflectivities, are experimentally studied. Finally, the optimized parameters and matching principle of fiber gratings in high-power fiber laser are obtained, thus providing an alternative method to improve the output characteristics of high-power continuous wave fiber laser.

**Keywords:** fiber lasers, fiber gratings, stimulated Raman scattering, fiber components

**PACS:** 42.55.Wd, 42.79.Dj, 42.65.Dr, 42.81.Wg

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190178

† Corresponding author. E-mail: [ericliu@fiber-resources.com](mailto:ericliu@fiber-resources.com)