

低反光纤光栅对光纤激光器光谱展宽影响研究

李登科¹, 尹路^{1,2}, 汤亚洲¹, 葛诗雨^{1,2}, 韩志刚¹, 沈华^{1,2}, 朱日宏^{1,2}

(1. 南京理工大学工业和信息化部先进固体激光技术重点实验室, 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 光纤激光器中的自相位调制(SPM)以及低功率下的空间烧孔效应(SHB)会导致输出光谱展宽。分析了SPM、SHB导致光谱展宽的理论模型, 讨论了低反光纤光栅(OC)的带宽与反射率对激光器输出光谱展宽的影响。实验研究了不同输出功率下激光器输出光谱随OC带宽及反射率的变化关系。结果表明减小OC带宽能够有效减缓SPM、SHB导致的输出光谱展宽; 减小OC反射率能降低SPM导致的输出光谱展宽速度, 却促进了SHB导致的光谱展宽; 但相同改变量的情况下, OC带宽所带来的影响较反射率更为显著。实验结果与理论分析一致, 对光谱合束及窄线宽高功率光纤激光器的设计与应用具有重要意义。

关键词: 光纤激光器; 光谱展宽; 自相位调制; 空间烧孔效应; 低反光纤光栅带宽; 低反光纤光栅反射率

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.04.013

Study on the effect of output coupler fiber Bragg grating on fiber laser spectral broadening

LI Deng-ke¹, YIN Lu^{1,2}, TANG Ya-zhou¹, GE Shi-yu^{1,2}, HAN Zhi-gang¹, SHEN Hua^{1,2}, ZHU Ri-hong^{1,2}

(1. MIIT Key Laboratory of Advanced Solid Laser, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The self-phase modulation (SPM) and spatial hole burning (SHB) at low power can lead to the output spectral broadening of a fiber laser. The effects of the bandwidth and reflectivity of OC (output coupler fiber Bragg grating) on fiber laser output spectral broadening were analyzed. The laser output spectral width changes with the bandwidth and reflectivity of the OC under different output powers were experimentally investigated. Experimental results show that the decrease of OC bandwidth can effectively reduce the output spectral broadening caused by SPM and SHB. The decrease of OC reflectivity can reduce the SPM-induced output spectral broadening speed and promote the SHB-induced spectral broadening. But in the same amount of change, the influence of bandwidth is more significant than that of reflectivity. The experimental results are consistent with the theoretical analysis, which has a great significance for the design and application of spectral beam combining and narrow linewidth high power fiber lasers.

Key words: fiber laser; spectral broadening; SPM; SHB; the bandwidth of OC; the reflectivity of OC

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2017YFB1104400); 国家自然科学基金项目(No. 61505082); 江苏省重点研发计划项目(No. BE2015163)资助。

作者简介: 李登科(1991-), 女, 硕士在读, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: lidengkenjust@163.com

通讯作者: 韩志刚(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事高功率光纤激光器及精密光学测试技术方面的研究。E-mail: hannjust@163.com

收稿日期: 2017-08-09; **修订日期:** 2017-09-24

1 引言

高功率光纤激光器具有光束质量好、发散角小以及稳定性高等突出特点,已成为高能激光领域的研究热点^[1-2]。近些年,随着光谱合束及窄线宽高功率光纤激光器技术的发展^[3-5],对光谱特性的研究已成为高功率光纤激光技术发展的重点方向之一。光谱合束与窄线宽高功率光纤激光器的设计均对激光器光谱带宽有很高要求^[6],因此对激光器输出光谱展宽的研究具有重要意义。

光纤激光器的输出光谱带宽通常是通过谐振腔控制,谐振腔由高反光纤光栅(HR)、低反光纤光栅(OC)以及增益光纤构成。目前,关于激光器输出光谱展宽的研究较少。S. K. Turitsyn 等^[7]建立了高非线性腔连续波掺 Yb³⁺ 光纤激光器的理论模型,由于准确的数值模拟需要复杂的计算,该模型只能做定性分析;Sergey I. Kablukov 等^[8-9]基于激光器的自相位调制(self-phase modulation, SPM)效应建立了输出光谱展宽的理论模型,研究了输出光谱带宽与功率的变化关系;国防科学技术大学刘伟等^[10]利用更为简洁的方法对激光器光谱展宽理论模型进行了推导,实验分析了不同功率下的输出光谱形态变化。但目前的大部分研究都只分析了激光器输出光谱展宽与增益光纤参数之间的关系,关于光纤光栅对输出光谱展宽影响的研究甚少。本文在文献[8]和文献[10]的研究基础上,分析了在 SPM 及低功率下的空间烧孔效应(spatial hole burning, SHB)过程中,OC 对激光器输出光谱展宽影响的理论因素;并分别从 OC 带宽及 OC 反射率对激光器输出光谱展宽影响两个方面进行了实验验证。

2 理论分析

2.1 光谱展宽理论

自相位调制(SPM)是指信号光强的瞬时变化引起其自身的相位调制。光脉冲在光纤的传播过程中,SPM 会产生与光强有关的非线性相移:

$$\phi_{NL}(L, T) = |U(0, T)|^2 (L_{eff}/L_{NL}) \quad (1)$$

式中, $U(0, T)$ 是 $Z = 0$ 处的场振幅; L_{eff} 和 L_{NL} 分别为光纤的有效长度和非线性长度^[11]。

SPM 感应的频谱变化是 ϕ_{NL} 时间相关性的直接结果,其可以理解为瞬时变化的相位表示光脉冲有不同的瞬时光频率^[11],该光频率距离中心频率 ω_0 的差值 δ_ω 为:

$$\delta_\omega(T) = -\frac{\partial \phi_{NL}}{\partial T} = -\left(\frac{L_{eff}}{L_{NL}}\right) \frac{\partial}{\partial T} |U(0, T)|^2 \quad (2)$$

δ_ω 的时间相关性称为频率啁啾,这种 SPM 造成的频率啁啾随传输距离的增大而增大。因此当光脉冲沿光纤传输时,新的频率分量不断产生,导致了初始频谱的展宽。

空间烧孔效应(SHB)是指在非均匀加宽工作物质中,频率为 ν_1 的光只对 ν_1 附近宽度约为 $(\nu - \nu_1) = \pm (1 + \frac{I}{I_s})^{1/2} \frac{\Delta\nu}{2}$ 范围内的粒子有饱和作用,对频率处在此范围外的反转粒子没有影响。所以在增益曲线上,会在频率 ν_1 处产生一个凹陷,凹陷宽度为 $\delta_\nu = (1 + \frac{I}{I_s})^{1/2} \Delta\nu$ ^[12]。这种 SHB 效应引起的增益变化会直接影响激光的输出光谱特性。

在多模固体激光器输出光谱特性分析中,达到信号光的饱和功率后,SHB 会影响到激光器输出光谱的带宽,通常掺 Yb³⁺ 光纤激光器这一阈值在几十毫瓦左右^[9],因此在低功率时,不能忽略 SHB 对激光器输出光谱带宽的影响。

2.2 理论模型

本文所述理论模型结构如图 1 所示,激光器的谐振腔由低反光纤光栅(OC)、增益光纤及高反光纤光栅(HR)构成。其中 OC 位于 $Z = 0$ 处,其反射谱函数为 $R(\omega) = R_0 \exp[-(\omega - \omega_0)^2 / (\Delta_{FBG}/2 \sqrt{\ln 2})^2]$, R_0 为 OC 的最大反射率, ω_0 为光栅对应的中心频率, Δ_{FBG} 为 OC 的反射谱半峰全宽;HR 位于 $Z = L$ 处,其反射率 $R = 1$, L 为激光器谐振腔长度, P^- 和 P^+ 分别为正反向传播的信号光功率。

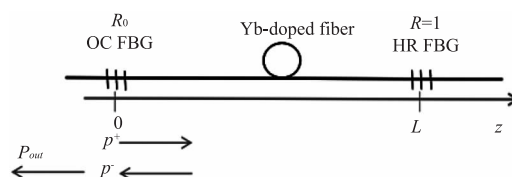


图 1 光纤激光器谐振腔结构图

Fig. 1 Scheme of fiber laser cavity

基于 SPM 效应的非相干光场在光纤中传播的光谱展宽过程,可以通过处理自相关函数 $K(\tau) = \int I(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega / 2\pi$ 来充分描述^[13]。因此,空间光谱强度分布为 $I^+(\omega)$ (对应光功率为 $P^+(z = 0)$) 的光经过一次往返传输后,相应的相干函数应满足:

$$K^-(\tau) = G \frac{K^+(\tau)}{[1 + \nu^2(K^+(0))^2 - K^+(\tau)^2]^2} \quad (3)$$

其中, $K^+(\tau)$ 和 $K^-(\tau)$ 分别表示 $Z=0$ 处反射和入射光波的相干函数; $G = P(0)/P^+ = \exp(2\int_0^L g_s dx)$ 为光波一次往返的增益; g_s 为饱和增益系数; $\nu = 2\gamma\bar{L}P^+/P^+(0)$ 为一次往返非线性特征数; γ 为非线性克尔系数; $\bar{P} = \int_0^L [P^+(x) + P^-(x)] dx/L$ 为腔内平均光功率。对式(3)的分母进行泰勒展开可得到:

$$K^-(\tau) \cong GK^+(\tau) [1 - 2\nu^2(K^+(0))^2 - K^+(\tau)^2] + O(\phi_{NL}^4) \quad (4)$$

当激光器达到稳定输出时,还应满足边界条件:

$$I^+(\omega) = R(\omega)I^-(\omega) \quad (5)$$

由此可得到关于 $K^+(\tau)$ 的恒等式:

$$\frac{1}{\Delta_{\text{FBG}}^2} \frac{d^2 K^+(\tau)}{d\tau^2} + (2\nu^2 R_0 G) \cdot K^+(\tau)^3 - (1 - R_0 G(1 - 2\nu^2 K^+(0)^2)) K^+(\tau) = 0 \quad (6)$$

根据文献[9]的分析方法,假设 $I^+(\omega)$ 具有高斯型:

$$I^+(\omega) = \frac{P^+(0)}{\sqrt{\pi}\Delta_2} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\Delta_2^2}\right) \quad (7)$$

根据边界条件有:

$$I^-(\omega) = \frac{P^-(0)}{\sqrt{\pi}\Delta_1} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\Delta_1^2}\right) \quad (8)$$

Δ_1 和 Δ_2 分别为正反向传播光场的光谱宽度,满足:

$$\frac{1}{\Delta_1^2} + \frac{1}{(\Delta_{\text{FBG}}/2\sqrt{\ln 2})^2} = \frac{1}{\Delta_2^2} \quad (9)$$

对式(7)和式(8)做傅里叶变化代入到式(6)中,可得到:

$$\Delta_1^2 = \Delta_2^2 \left[1 + \frac{\nu^2 P^+(0)^2}{\pi^2}\right] \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)简化后得到:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{\nu P^+(0)}{\pi} \cdot \frac{\Delta_{\text{FBG}}}{2\sqrt{\ln 2}} \\ &= (4/\pi)\gamma L \frac{P_{\text{out}}}{\ln(1/R_0)} \cdot \frac{\Delta_{\text{FBG}}}{2\sqrt{\ln 2}} \end{aligned} \quad (11)$$

由于激光器输出光谱函数 $I_{\text{out}}(\omega)$ 满足: $I_{\text{out}}(\omega) = I^-(\omega) \cdot T(\omega)$, 其中 $T(\omega) = 1 - R(\omega)$

为 OC 的透射率函数。通常情况下 $T(\omega) \geq 0.9$, 且 $\Delta_1 \leq \Delta_{\text{FBG}}$, 因此 $I^-(\omega)$ 透过 OC 后的输出光谱形状基本不变,由此得到 SPM 下的输出光谱宽度为:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{FWHM}} &= 2\sqrt{\ln 2}\Delta_1 \\ &= (4/\pi)\Delta_{\text{FBG}}\gamma L \frac{P_{\text{out}}}{\ln(1/R_0)} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, Δ_{FWHM} 为输出光谱的半峰全宽。

对于低功率下 SHB 所导致的光谱展宽,现有的分析模型已经相对成熟,根据文献[8]的结论,SHB 效应下的输出光谱宽度为:

$$\Delta_{\text{SHB}} = (\Delta_{\text{FBG}}^2 H \ln(1/R_0))^{1/3} \quad (13)$$

其中, $H(H = c/2Ln)$ 为激光器的纵模间隔; n 为光纤的折射率。

由式(12)及式(13)可看出,在 SPM 与低功率下 SHB 效应造成光谱展宽过程中,OC 带宽 Δ_{FBG} 与 OC 反射率 R_0 是至关重要的影响因素。

3 实验研究

为了进一步探究 OC 与激光器输出光谱展宽之间的关系,我们搭建了光纤激光器光谱展宽实验测试系统,分别从 OC 带宽及 OC 反射率对光谱展宽影响两方面进行了实验分析。

实验测量系统结构如图 2 所示。半导体泵浦源经过合束器与谐振腔相连接,谐振腔输出的激光依次通过包层光剥离器(CPS)与 QBH(Quartz block high power)后进入功率计与光谱仪,分别进行输出功率与光谱的测量。激光器系统采用三只凯普林半导体激光器作为泵浦源,中心波长 $\lambda_c = 976$ nm,单支满功率 $P = 100$ W。增益光纤采用 Nufern 公司 LMA 20/400 μm 双包层掺 Yb^{3+} 光纤,纤芯及内包层直径分别为 20 μm 及 400 μm ,数值孔径分别 $\text{NA} = 0.06$ 和 $\text{NA} = 0.46$,光纤长度 $Z = 18$ m,非线性克尔系数 $\gamma = 0.57 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 。

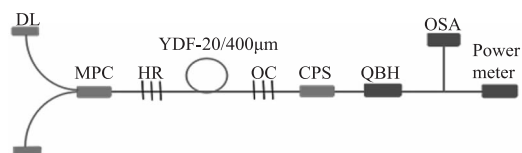


图2 实验测量系统图

Fig. 2 Experimental measurement system

光栅均采用实验室自制高功率光纤光栅,自制光纤光栅采用紫外激光掩膜版法刻制,刻制光栅的光纤类型为 Nufern 公司 LMA 20/400 μm 双包层无源光纤。光谱测量采用日本 YOKOGAWA 公司光谱

测量仪:型号 AQ6370D,分辨率 0.02 nm,测量精度 ± 0.01 nm。激光器实验系统所采用 HR 光谱图如图 3 所示,基本参数如下:反射率 99%,带宽 2.03 nm,中心波长 1080.08 nm。

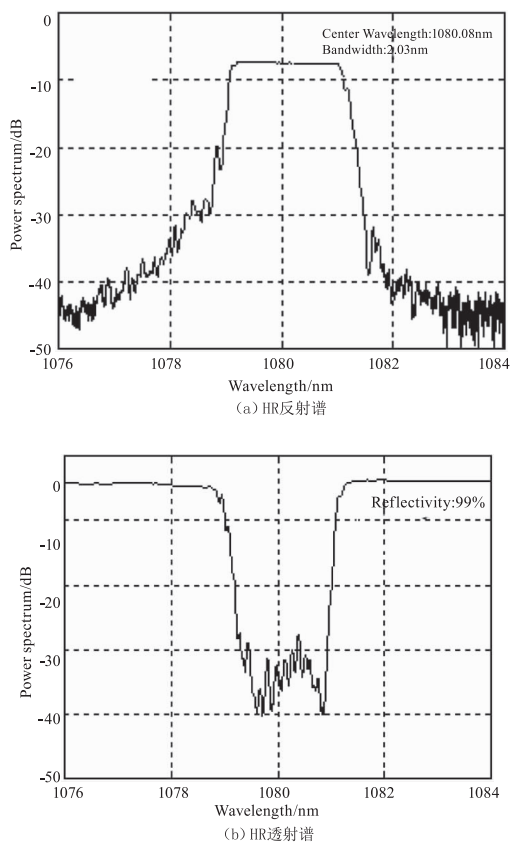


图3 激光器系统 HR 光谱图

Fig.3 HR spectrum of laser system

光纤光栅参数通常采用透射谱法测量,但是由于 OC 反射率较低,直接采用透射谱法测量误差较大。因此本文测量 OC 参数采用如下方法:首先采用透射谱法测量 HR 透射谱获取其反射率,再以此 HR 作为参考 HR,比较宽谱光源依次经过参考 HR 和待测 OC 后反射光的功率比。此时要求参考 HR 与待测 OC 中心波长不同,且反射率大于 99%。因功率比在光谱仪中可用 dB 进行计算,最后可根据公式 $R_{oc} = 10^{\frac{\alpha}{10}}$ 计算 OC 反射率,其 α 为参考 HR 反射谱峰值与待测量 OC 反射谱峰值 dB 差。

3.1 OC 带宽对输出光谱展宽影响

为了探究 OC 带宽对激光器输出光谱展宽的影响,采用两个带宽不同,反射率相等的 OC 进行实验。实验 1 和实验 2 分别采用 OCI 与 OCII 作为低反光纤光栅,基本参数如表 1 所示。

表1 OCI 与 OCII 参数表

Tab.1 Parameters of OCI and OCII

Parameter	OCI	OCII
Center Wavelength λ /nm	1079.88	1079.82
Reflection Bandwidth $\Delta\lambda$ /nm	0.77	0.56
Reflectivity R /%	8.5	8.5

OCI 与 OCII 的反射光谱图如图 4 所示,每幅光谱图左侧为参考 HR 反射谱,右侧为 OC 反射谱。

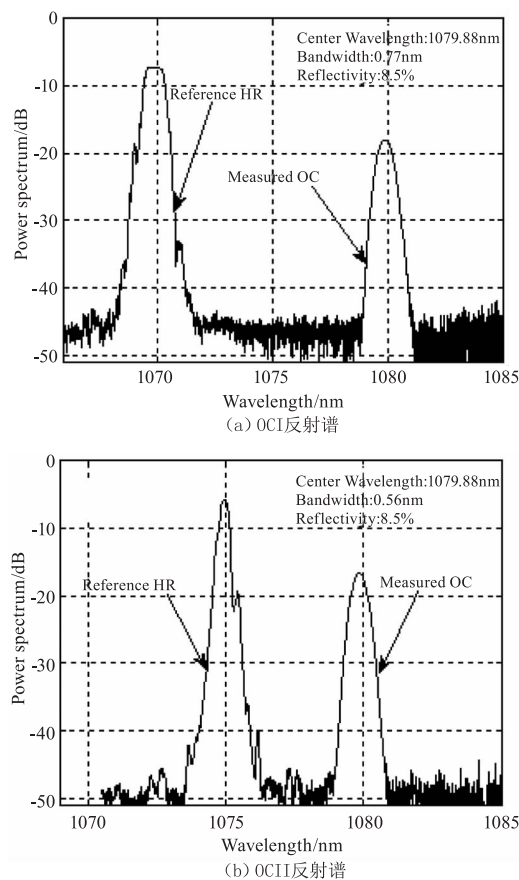
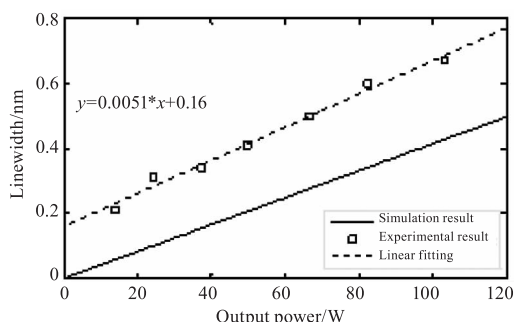


图4 OCI 与 OCII 反射光谱图

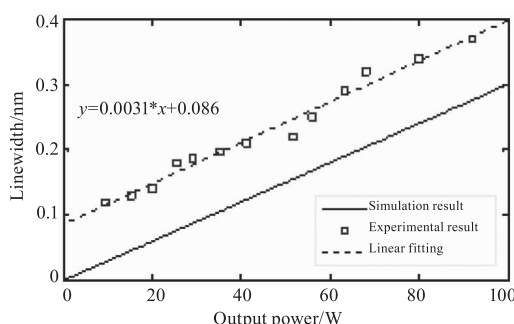
Fig.4 Reflection spectrum of OCI and OCII

实验结果如图 5 所示,图 5(a)、5(b)分别为实验 1 和实验 2 输出光谱 FWHM 随输出功率变化情况,其中实线为式(12)仿真计算结果,虚线为实验数据线性拟合结果;图 5(c)、5(d)为不同功率下实验 1 和实验 2 归一化输出光谱图,其中虚线为实际光谱形态,实线为高斯拟合结果。由图 5(a)、5(b)可明显观察到,输出光谱的 FWHM 随输出功率均呈线性变换,实验 1 和实验 2 变化斜率分别为 0.0051 nm/W 与 0.0031 nm/W,与理论推导中式(12)计算的理论值 0.0041 nm/W 与 0.003 nm/W 基本一致。实验测得低功率下实验 1 和实验 2 输出光谱宽度分别为

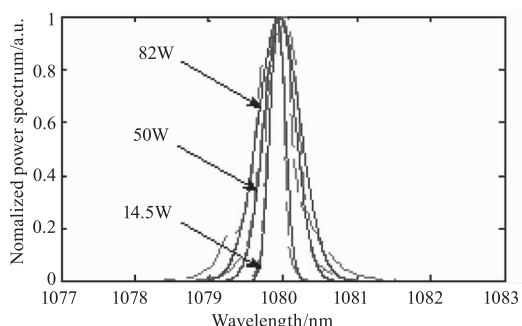
0.0731 nm 与 0.0517 nm, 与式(13)理论计算值 0.0689 nm 与 0.0557 nm 基本一致。



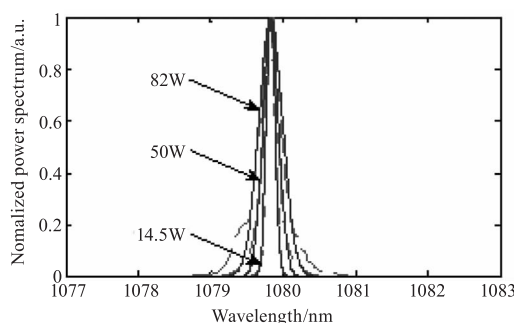
(a) 实验1输出光谱FWHM随输出功率变化



(b) 实验2输出光谱FWHM随输出功率变化



(c) 不同功率下实验1输出光谱图



(d) 不同功率下实验2输出光谱图

图5 实验1与实验2输出光谱随功率变化

Fig. 5 The outputspectra versus the output power for Experiment 1 and Experiment 2

对比两组实验结果我们可以看出:减小 OC 带宽降低了输出光谱的展宽速度,同时也降低了低功

率下的输出光谱带宽,该现象由图 5(c)、5(d)可以明显观察到。两种情况下的降低百分比分别接近理论值 $\frac{\Delta_{\text{FBG2}}}{\Delta_{\text{FBG1}}}$ 与 $(\frac{\Delta_{\text{FBG2}}}{\Delta_{\text{FBG1}}})^{2/3}$, 其中 Δ_{FBG1} 与 Δ_{FBG2} 分别为 OCI 与 OCII 带宽。

3.2 OC 反射率对输出光谱展宽影响

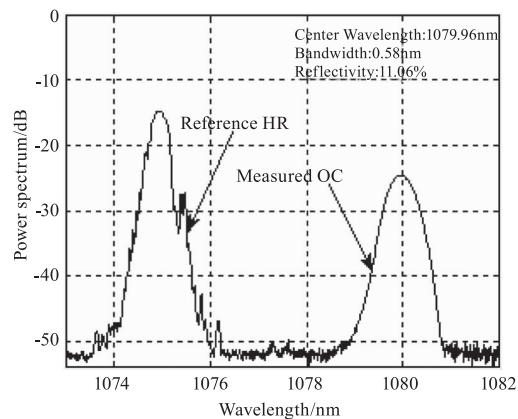
为了探究 OC 反射率对输出光谱展宽影响,采用两个反射率不同,带宽近似相等的 OC 进行实验。实验 3 和实验 4 分别采用 OC III 与 OCIV 作为低反光纤光栅,基本参数如表 2 所示。

表 2 OC III 与 OCIV 参数表

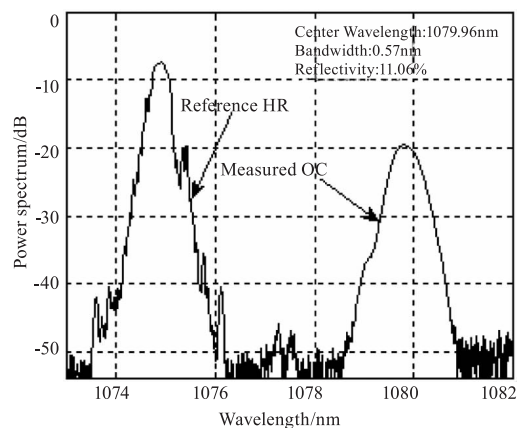
Tab. 2 Parameters of OC III and OCIV

Parameter	OC III	OCIV
Center Wavelength λ /nm	1079.96	1079.83
Reflection Bandwidth $\Delta\lambda$ /nm	0.58	0.57
Reflectivity R / %	11.06	6

OC III 与 OCIV 的反射光谱图如图 6 所示,每幅光谱图左侧为参考 HR 反射谱,右侧为 OC 反射谱。



(a) OCIII反射谱

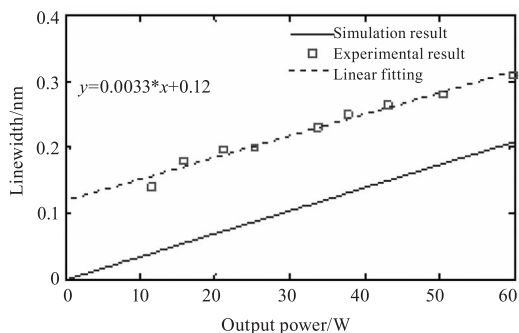


(b) OCIV反射谱

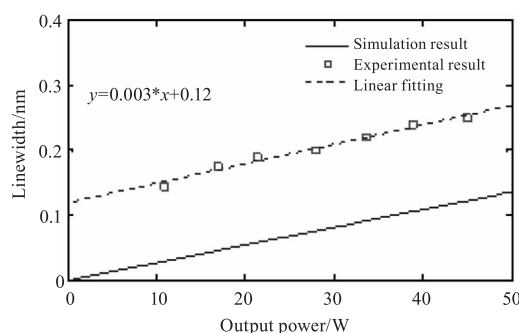
图6 OC III 与 OCIV 反射光谱图

Fig. 6 Reflection spectrum of OC III and OCIV

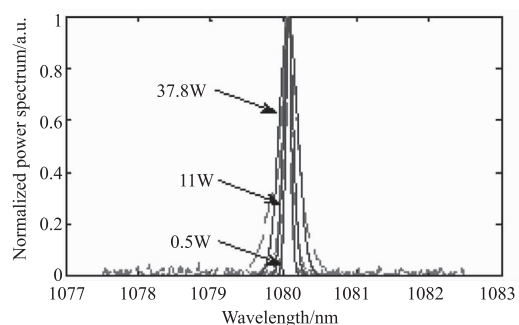
实验结果如图7所示,图7(a)、6(b)分别为实验3和实验4输出光谱 FWHM 随输出功率变化情况,其中实线为式(12)仿真计算结果,虚线为实验数据线性拟合结果;图7(c)、7(d)分别为不同功率下实验3和实验4归一化输出光谱图,其中虚线为实际光谱形态,实线为高斯拟合结果。由图7(a)、7(b)可明显观察到,输出光谱的 FWHM 随输出功率均呈线性变换,实验3和实验4变化斜率分别为 0.0033 nm/W 与 0.003 nm/W ,与理论推导中式(12)计算的理论值 0.0034 nm/W 与 0.0026 nm/W 基本一致。实验测得低功率下实验3和实验4输出光谱宽度分别为 0.056 nm 与 0.069 nm ,与式(13)理论计算值 0.0549 nm 与 0.0589 nm 基本一致。



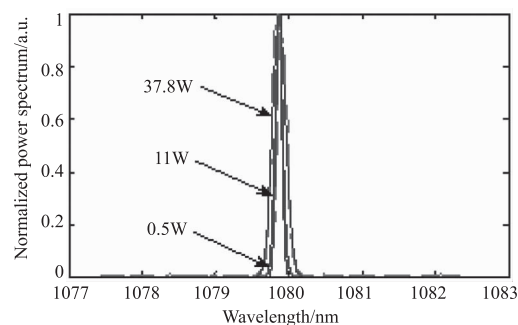
(a) 实验3输出光谱FWHM随输出功率变化



(b) 实验4输出光谱FWHM随输出功率变化



(c) 不同功率下实验3输出光谱图



(d) 不同功率下实验4输出光谱图

图7 实验3与实验4输出光谱随功率变化

Fig. 7 The output spectra versus the output power for Experiment 3 and Experiment 4

对比两组实验结果我们可以看出:减小 OC 反射率降低了输出光谱的展宽速度,下降百分比接近理论值 $\frac{\ln(1/R_3)}{\ln(1/R_4)}$, 其中 R_3 、 R_4 分别为 OC III 与 OC IV 的反射率;但减小 OC 反射率却增大了低功率下的输出光谱带宽,增大倍数接近理论值 $\left[\frac{\ln(1/R_4)}{\ln(1/R_3)}\right]^{1/3}$ 。

4 结论

本文分析了在 SPM 及低功率下 SHB 效应过程中,OC 对激光器输出光谱展宽影响的理论模型,并分别从 OC 带宽及反射率对输出光谱展宽影响两方面进行了实验验证。实验结果表明,减小 OC 带宽能够有效减缓 SPM 及 SHB 导致的输出光谱展宽;减小 OC 反射率能降低 SPM 带来的输出光谱展宽速度,却促进了 SHB 导致的输出光谱展宽。结果也表明 OC 带宽与反射率对激光器输出光谱展宽均有影响,但相同改变量的情况下,OC 带宽所带来的影响较反射率更为显著。随着光谱合束及窄线宽高功率激光器对光谱宽度要求的提高,激光器光谱展宽的相关研究意义重大。在今后的研究中,如果能将本文结论合理应用于 MOPA(主振荡功率放大器)光纤激光系统种子源的设计中,定能获得高质量的激光输出。

参考文献:

- [1] ZHANG Xiujuan, DUAN Yunfeng, ZHAO Shui, et al. Experimental study on high efficient all-fiber lasers at 1018 nm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, (4): 211 - 215. (in Chinese)

张秀娟,段云锋,赵水,等. 高效率 1018 nm 全光纤激光

- 器实验研究[J]. 光学学报, 2016, (4): 211 – 215.
- [2] ZHANG Renli, ZHANG Bin, QI Yan, et al. High power 1018nm continuous wave ytterbium-doped fiber laser[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(9): 1073 – 1075. (in Chinese)
张仁栗, 张彬, 亓岩, 等. 高功率 1018 nm 连续掺镱光纤激光器[J]. 激光与红外, 2016, 46(9): 1073 – 1075.
- [3] Beier F, Hupel C, Nold J, et al. Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier[J]. Optics Express, 2016, (8): 14 – 24.
- [4] Huang Z, Liang X, Li C, et al. Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-line-width multilongitudinal-mode oscillators[J]. Applied Optics, 2016, 55(2): 297.
- [5] ZHANG Dayong, HAO Jinping, ZHU Chen, et al. Review on spectral beam combining of fiber lasers[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5): 517 – 521. (in Chinese)
张大勇, 郝金坪, 朱辰, 等. 光纤激光器光谱合束技术综述[J]. 激光与红外, 2016, 46(5): 517 – 521.
- [6] MA Yi, YAN Hong, PENG Wanjiang, et al. 9.6 Kw common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2016, (9): 55 – 61. (in Chinese)
马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW 共孔径光谱合成光源[J]. 中国激光, 2016, (9): 55 – 61.
- [7] Turitsyn S K, Bednyakova A E, Fedoruk M P, et al. Modeling of CW Yb-doped fiber lasers with highly nonlinear cavity dynamics[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8394 – 8405.
- [8] Kablukov S I, Zlobina E A, Podivilov E V, et al. Output spectrum of Yb-doped fiber lasers[J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2508 – 2510.
- [9] Kablukov S I, Zlobina E A, Podivilov E V, et al. Modeling and measurement of ytterbium fiber laser generation spectrum[C]// SPIE Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [10] LIU Wei, XIAO Hu, WANG Xialin, et al. Study on output spectral characteristic of Yb-Doped fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, (9): 34 – 38. (in Chinese)
刘伟, 肖虎, 王小林, 等. 掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性研究[J]. 中国激光, 2013, (9): 34 – 38.
- [11] Agrawal, Govind. Nonlinear Fiber Optics[M]. 5th ed. Academic Press, 2013.
- [12] CHEN Jiabi, PENG Runling. Laser principle and application, [M]. 2nd. ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
陈家璧, 彭润玲. 激光原理及应用. [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [13] Manassah J T. Self-phase modulation of incoherent light[J]. Optics Letters, 1990, 16(21): 1638 – 1640.