

掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性研究

刘 伟 肖 虎 王 小 林 周 朴*

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 建立了基于自相位调制效应的掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性的解析模型, 实验测量分析了输出光谱的形态, 输出光谱随功率升高的变化趋势以及低功率下的输出光谱特性。实验结果表明, 理论模型与实验结果吻合地较好, 并且能够较为准确地得到输出光谱宽度随功率的变化规律以及低功率下输出光谱的特性。

关键词 激光器; 光纤激光; 输出光谱; 光谱展宽

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0902006

Study on Output Spectral Characteristic of Yb-Doped Fiber Lasers

Liu Wei Xiao Hu Wang Xiaolin Zhou Pu

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Based on self-phase modulation, an analytical model of Yb-doped fiber laser describing its output spectral characteristics has been developed. The output spectral shape, the variation trend of output spectrum along with the increased power, and its characteristics in low-power have been analyzed by experimental measurement. As the experimental results show, this analytical model agrees well with the experimental results, and through this model, the variation of the output spectral line width with the variational output power and the spectral characteristics in low power can be accurately obtained.

Key words lasers; fiber laser; output spectrum; spectral broadening

OCIS codes 140.3430; 140.3510; 190.4360

1 引 言

掺 Yb 光纤激光器是目前国内外的研究热点^[1]。当前研究人员关注的重点是提高输出功率、激光器效率和光束质量, 而对于另外一个重要参数——光谱特性则报道较少。一方面, 在那些需要用到可调谐、窄线宽光谱的领域, 激光器的光谱特性较为重要; 另一方面, 在高功率情况下, 掺 Yb 光纤激光器的输出光谱可能会超过光纤光栅的反射谱宽, 会对整个激光器的稳定性产生影响。目前, 对于掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性的研究开展较少, 国外主要有俄罗斯科学院西伯利亚分院^[2]和英国阿斯顿大学^[3]开展了相关研究, 而国内的研究主要集中于利用光纤激光实现超连续谱的产生^[4-6]。本文在文献[2]的基础上, 建立基于自相位调制 (SPM) 效应的掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性的改进模

型, 并开展了实验研究, 分析不同条件下输出光谱的变化规律。实验结果验证了理论模型的正确性。

2 理论分析

2.1 掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性

掺 Yb 光纤激光器腔分析的基本结构如图 1 所示。其中高反射率光栅 (HR FBG, 反射率 $R=1$) 和高透射率光栅 (HT FBG, 反射率为 R_0) 构成了光纤激光器的谐振腔, L 为光纤激光器的腔长, P_{\pm} 分别表示正反向传播的信号光功率。

利用文献[7]中基于 SPM 效应的非相干光场在非掺杂光纤中传输的分析方法, 输入光场的自相关函数定义为

$$K_+(\tau) = \int I_+(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega / 2\pi, \quad (1)$$

收稿日期: 2013-01-21; 收到修改稿日期: 2013-04-10

作者简介: 刘 伟(1991—), 男, 本科, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: aiken09@163.com



图 1 光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Scheme of fiber laser cavity

于是,可以这样描述对应于功率 $P_+(x=0)$ 的空间光谱强度分布 $I_+(\omega)$ 的演变:经过一次往返传输,相应的相干函数满足^[8]

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

式中 $K_+(\tau)$ 分别表示 $x=0$ 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; $\nu = 2\gamma L \bar{P}/P_+(0)$ 为一次往返的非线性特征数, γ 为非线性克尔系数; $\bar{P} = \int_0^L [P_+(x) + P_-(x)] dx/L$ 为腔内的平均光功率。

光纤激光器达到稳定输出时,经过一次完整的往返(再经过高透射率光栅的反射),其光谱应该是自再现的,因此还应该满足边界条件

$$R(\omega)I_-(\omega) = I_+(\omega), \quad (3)$$

式中 $R(\omega) = R_0 \exp(-\omega^2/\Delta_{\text{FBG}}^2)$, Δ_{FBG} 为光栅的反射谱半峰全宽(FWHM)。

对于(2)式和(3)式进行求解即可得到输出光谱。考虑到高透射率光栅的反射谱通常具有高斯型,不妨假设 $I_-(\omega)$ 具有高斯型:

$$I_-(\omega) = \frac{P_-(0)}{\sqrt{\pi}\Delta_1} \exp\left(-\frac{\omega^2}{\Delta_1^2}\right), \quad (4)$$

那么由边界条件(3)式可以得到

$$I_+(\omega) = \frac{P_+(0)}{\sqrt{\pi}\Delta_2} \exp\left(-\frac{\omega^2}{\Delta_2^2}\right), \quad (5)$$

式中

$$\frac{1}{\Delta_1^2} + \frac{1}{\Delta_{\text{FBG}}^2} = \frac{1}{\Delta_2^2}, \quad (6)$$

式中 Δ_1 和 Δ_2 分别为正反向传播光场的光谱(4)式和(5)式作傅里叶变换并代入(2)式化简得到

$$\exp\left(\frac{\Delta_1^2 - \Delta_2^2}{8}\tau^2\right) =$$

$$1 + \frac{\nu^2 P_+(0)^2}{4\pi^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta_2^2}{2}\tau^2\right)\right]. \quad (7)$$

如果 $I_-(\omega)$ 具有高斯型成立,(7)式应该是一个恒等式。当 τ 很小时,利用泰勒展开化简可以得到(7)式恒成立的条件为

$$\Delta_1^2 = \Delta_2^2 \left[1 + \frac{\nu^2 P_+(0)^2}{\pi^2}\right], \quad (8)$$

代入(6)式并化简最终得到

$$\Delta_1 = \frac{\nu P_+(0)}{\pi} \Delta_{\text{FBG}} = (4/\pi) \Delta_{\text{FBG}} \gamma L \frac{P_{\text{out}}}{\ln(1/R_0)}. \quad (9)$$

由此得到输出光谱谱宽为

$$V_{\text{FWHM}} = (4/\pi) \Delta'_{\text{FBG}} \gamma L \frac{P_{\text{out}}}{\ln(1/R_0)}, \quad (10)$$

式中 Δ'_{FBG} 为输出光光谱的 FWHM, $\Delta'_{\text{FBG}} = 2\sqrt{\ln 2} \Delta_{\text{FBG}}$; P_{out} 为输出功率。

2.2 空间烧孔效应对光谱的影响

在多模固体激光器输出光谱特性的分析中,达到信号光的饱和功率后,空间烧孔效应(SHB)会影响到激光器输出光谱的线宽,而对于掺 Yb 光纤激光器,这一功率在几十毫瓦左右,因此在考虑低功率下掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性时,不能忽略空间烧孔效应。结合固体激光器对于空间烧孔效应的分析方法^[9],利用文献[8]的结果,对于能够稳定输出的纵模,其平均增益应等于损耗:

$$2 \int_0^L \bar{g}_s(z) dz - \ln\left(\frac{1}{R_m}\right) = \int_0^L \bar{g}_s(z) \frac{\bar{I}_m^+(z) + \bar{I}_m^-(z)}{P_-(z) + P_+(z)} dz. \quad (11)$$

(11)式的右边表示考虑到空间烧孔效应引起的增益系数的下降。这里, $\bar{g}_s(z) = \frac{g_0 P_s}{P_-(z) + P_+(z)}$ 为考虑饱和效应的平均增益系数, g_0 为小信号增益系数, p_s 为饱和功率。 $\bar{I}_m^+(z)$ 和 $\bar{I}_m^-(z)$ 分别为正反向传播第 m 个模式的信号光的强度, $R_m = R_0[-(H \cdot$

$m/\Delta_{\text{FBG}})^2]$ 为光栅对应于第 m 个模式的反射率, H 为激光器的纵模间隔。

由前面的边界条件(3)式, 利用光谱强度的幅值应该满足的关系, 还可以得到

$$G_{R_0} = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_1}{\Delta_{\text{FBG}}}\right)^2 + 1},$$

$$\ln(G_{R_0}) = \frac{1}{2} \ln\left[\left(\frac{\Delta_1}{\Delta_{\text{FBG}}}\right)^2 + 1\right] \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_{\text{FBG}}}\right)^2, \quad (12)$$

把(12)式代入(11)式可以得到

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_{\text{FBG}}}\right)^2 - \left(\frac{H \cdot m}{\Delta_{\text{FBG}}}\right)^2 = \int_0^L \bar{g}_s(z) \frac{\bar{I}_m^+(z) + \bar{I}_m^-(z)}{P_-(z) + P_+(z)} dz, \quad (13)$$

由(13)式左边大于零得到

$$|H \cdot m| \leq \sqrt{\frac{1}{2}} \Delta_1, \quad (14)$$

再由(13)式, 对所有可能存在的模式求和得到

$$\frac{2m' + 1}{2} \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_{\text{FBG}}}\right)^2 - \frac{2m'(m' + 1)(2m' + 1)}{6} \left(\frac{H}{\Delta_{\text{FBG}}}\right)^2 = \frac{1}{2} \ln G. \quad (15)$$

考虑到输出光谱中包含的模式数 $|m'| > 1$, 并且

$$|H \cdot m'| = \sqrt{\frac{1}{2}} \Delta_1, \text{ 对(15)式简化得到输出光谱为}$$

$$\Delta_{\text{SHB}} = 2 \ln 2 \Delta_1 = 2 \ln 2 \left[\frac{3}{2\sqrt{2}} \ln\left(\frac{1}{R_0}\right) H \Delta_{\text{FBG}}^2 \right]^{1/3} = \left[\frac{3}{\sqrt{2}} \ln 2 \ln\left(\frac{1}{R_0}\right) H \Delta_{\text{FBG}}'^2 \right]^{1/3}. \quad (16)$$

这即是由空间烧孔效应带来输出光谱展宽。

3 实验研究

实验中的光纤激光器的基本结构如图 2 所示。双包层掺 Yb 光纤的基本参数如下; 纤芯直径 $d = 10 \mu\text{m}$; 数值孔径 $NA = 0.08$, 长度为 9 m, 非线性折射率 $n_2 \approx 2.3 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$, 参照计算非线性克尔系数的一般计算方法^[10], 可以得到非线性克尔系数 $\gamma = 1.25 \text{ km} \cdot \text{W}^{-1}$ 。激光器采用两只中心波长为 975 nm 的半导体激光器作为抽运源, 激光器的腔长为 9 m, 光纤光栅的中心波长均为 1070 nm, 高反光栅的反射率为 99%, 反射谱宽为 1 nm, 高透射率光栅的中心透射率为 10%, FWHM 为 500 pm。



图 2 光纤激光器的实际结构

Fig. 2 Experimental scheme of Yb-doped fiber laser

实验结果如图 3 所示。图 3(a) 中虚线为实际光谱形态, 实线为高斯拟合结果。拟合结果与实验结果对比说明输出功率基本上具有高斯函数的形式, 这与理论分析的结果是一致的。从图 3(a) 中也可以观察到较为明显的光谱展宽现象, 为了对光谱展宽进行定量的分析, 本文对输出光谱的 FWHM

随功率变化进行分析, 其变化趋势以及用直线拟合结果如图 3(b) 所示。可以观察到输出光谱的 FWHM 随输出功率的增加的变化关系近似为线性。实验中测得输出光谱随功率变化的斜率为 2.935 pm/W , 与由(10)式计算得到的理论值 3.11 pm/W 基本一致。对于低功率下的输出谱宽,

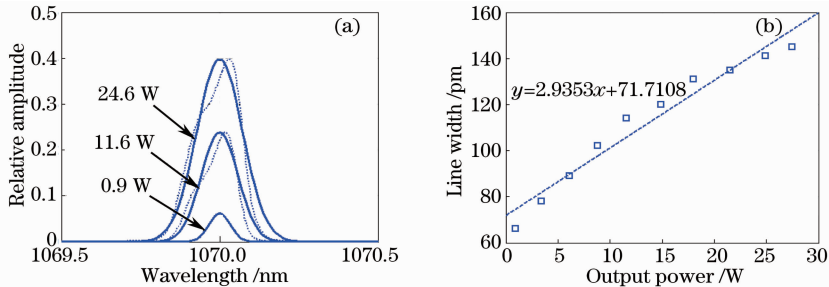


图 3 (a) 不同功率下的输出光谱形态; (b) 谱宽随功率变化线性拟合结果

Fig. 3 (a) Shape of output spectra for different output powers;

(b) FWHM linewidth versus output power and linear approximation

实验中测得结果为 62.9 pm,与利用(16)式计算得到的输出光谱 40.9 pm 基本一致。

为了进一步探究光纤激光器输出光谱超过光栅的反射谱宽时可能的影响,在该实验的基础上,在掺 Yb 光纤与低反光栅之间增加了 100 m 长的非掺杂光纤进行实验。实验结果如图 4 所示,此时激光器输出光谱已经远超过高透射率光栅的反射谱宽,但是光谱基本还是呈高斯型,此时的拟合斜率为 30.6 pm/W,与理论值 37.7 pm/W 也基本一致。

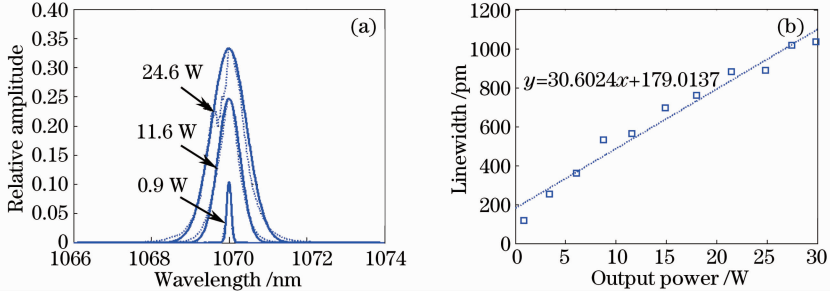


图 4 (a) 不同功率下的输出光谱形态; (b) 谱宽随功率变化线性拟合结果

Fig. 4 (a) Shape of output spectra for different output powers;

(b) FWHM linewidth versus output power and linear approximation

为了进一步探究提高功率情况下输出光谱的可能变化,改用 15 μm 纤芯的光纤进行实验。此时光纤非线性克尔系数 $\gamma=0.99 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ 。激光器的腔长为 6 m,高反光栅的反射率为 99%,反射谱宽为 1 nm(95%),高透射率光栅的中心透射率为 15%,FWHM 为 500 pm。实验结果如图 5 所示,输出光

这反映了光纤激光器输出光谱超过高透射率光栅的反射谱宽时对于激光器的稳定性影响不大。对于低功率下的输出谱宽,实验中测得结果为 115.5 pm,与利用(16)式计算得到的输出光谱 17.8 pm 相差较大。理论上,增加掺杂光纤的长度能够减小光纤激光器的输出谱宽,但是实验结果说明增加非掺杂光纤带来了相反的影响,并且此时已经不能忽略色散的影响,色散也会引起激光器的光纤的光谱展宽^[11]。

谱在高功率情况下开始偏离高斯型,此时的斜率 0.860 pm/W比理论值 1.993 pm/W 小了很多,输出光谱在功率进一步提高的时候开始变得平缓^[12]。若仅对于较低功率下的数据进行拟合,得到斜率为 1.770 pm/W,与理论值 1.993 pm/W 是一致的。

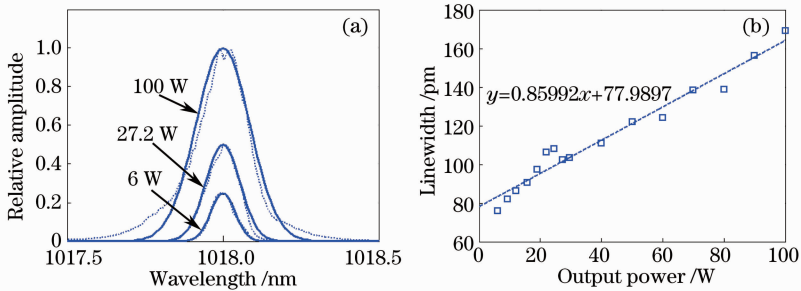


图 5 (a) 不同功率下的输出光谱形态; (b) 谱宽随功率变化线性拟合结果

Fig. 5 (a) Shape of the output spectra for different output powers;

(b) FWHM linewidth versus output power and linear approximation

对于低功率下的输出谱宽,实验中测得结果为 64.7 pm,与利用(16)式计算得到的输出光谱 43.4 pm基本一致。

4 结 论

提出了掺 Yb 激光器输出光谱改进模型,对不同条件下掺 Yb 光纤激光器的输出光谱进行测量。该激光器的光谱展宽模型能够很好地解释由于

SPM 影响的输出光谱的高斯形态以及输出线宽随功率的线性变化,并且结合空间烧孔效应能够较好地说明低功率下的输出光谱。实验结果还表明光纤激光器输出光谱超过光栅的反射谱宽时对于激光器的稳定性影响不大,并且随着输出功率的进一步提高,激光器光谱展宽变化趋势将趋于平缓,并且输出光谱形态也会偏离高斯型。本实验结果对高功率激光器的设计以及应用有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 D J Richardson, J Nilsson, W A Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63—B92.
- 2 S I Kablukov, E A Zlobina, E V Podivilov, *et al.*. Output spectrum of Yb-doped fiber lasers[J]. Opt Lett, 2012, 37(13): 2508—2510.
- 3 S K Turitsyn, A E Bednyakova, M P Fedoruk, *et al.*. Modeling of CW Yb-doped fiber lasers with highly nonlinear cavity dynamics[J]. Opt Express, 2011, 19(9): 8394—8405.
- 4 Hao Zhijian, Lei Dajun, Zhao Chujun, *et al.*. Generation of mid-infrared supercontinuum in two cascaded fibers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0105009.
郝志坚, 雷大军, 赵楚军, 等. 两级光纤中的中红外超连续谱产生[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105009.
- 5 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guili, *et al.*. Dual-wavelength pumped supercontinuum generation in tapered photonic crystal fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0206001.
奚小明, 陈子伦, 孙桂林, 等. 双波长抽运拉锥光子晶体光纤产生超连续谱研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0206001.
- 6 Liu Chu, Eric Ress, Toni Laurila, *et al.*. Experimental research on supercontinuum generation from nanosecond pulse and conventional single mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0705003.
刘 楚, Eric Ress, Toni Laurila, 等. 纳秒脉冲在普通单模光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0705003.
- 7 J T Manassah. Self-phase modulation of incoherent light[J]. Opt Lett, 1991, 15(6): 329—331.
- 8 S I Kablukov, E A Zlobina, Evgeniy V Podivilov, *et al.*. Modeling and measurement of ytterbium fiber laser generation spectrum[C]. SPIE, 2012, 8433: 843305.
- 9 Y I Khanin. Fundamentals of Laser Dynamics[M]. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2006.
- 10 G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics[M]. San Diego: Academic Press, 2001.
- 11 D B S Soh, J P Koplow. Analysis of spectral broadening of incoherent light in optical fibers with nonzero dispersion[J]. Opt Engng, 2011, 50(11): 111602.
- 12 Marc-André Lapointe, Michel Piché. Linewidth of high-power fiber lasers[C]. SPIE, 2005, 7386: 73860.

栏目编辑:宋梅梅