

# 单纵模分布反馈式光纤激光器的相干坍塌特性研究

熊水东 刘文\* 杨华勇 马丽娜

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要** 通过建立复合腔模型,分析了外光反馈对单纵模分布反馈式(DFB)光纤激光器稳定性的影响,研究了外光反馈引起的相干坍塌阈值特性。通过采用模式分裂表征方法和相位噪声表征方法,对DFB光纤激光器的相干坍塌现象进行了对照检测,成功测量了瑞利散射和端面反射分别引起单纵模DFB光纤激光器发生相干坍塌时工作纵模的分裂情况,证明只考虑瑞利散射时DFB光纤激光器的阈值传导光纤长度小于200 m。实验结果和理论分析相吻合,验证了采用上述两种方法检测相干坍塌的可行性,对于DFB光纤激光传感阵列的结构设计具有指导意义。

**关键词** 光纤激光器;相干坍塌;非平衡光纤干涉仪;频率偏移;瑞利散射

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.021404

## Investigation on the Coherence Collapse Characteristics of Single-Longitudinal-Mode DFB Fiber Laser

Xiong Shuidong Liu Wen Yang Huayong Ma Lina

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

**Abstract** Based on the composite cavity model, the feedback-induced instabilities which may cause coherence collapse in single-longitudinal-mode distributed feedback (DFB) fiber lasers are analyzed. The coherence collapse of DFB fiber laser is detected, and the longitudinal operating mode splitting phenomena of DFB fiber laser due to Rayleigh backscattering and the facet reflection are measured simultaneously. Experiments show that the threshold of the length of the leading fiber cannot exceed 200 m, which keeps quantitative agreement with the results of simulation. The investigation proves the feasibility of the two methods for detecting coherence collapse, i.e., mode splitting method and phase noise method, and provides a guide to the design of DFB fiber laser sensor array.

**Key words** fiber laser; coherence collapse; unbalanced fiber-optic interferometer; frequency shift; Rayleigh backscattering

**OCIS codes** 140.3510; 030.4070; 140.3500

## 1 引言

分布反馈式(DFB)光纤激光器具有稳定的单纵模输出、频率噪声低和易于复用的本征特性,因而被广泛应用于光纤传感领域<sup>[1-7]</sup>。虽然DFB光纤激光器在构造传感阵列方面具有突出优势,然而目前报道的最大阵列规模尚未超过20基元<sup>[2]</sup>,并不能体现出其在单根光纤上进行波分复用的优势所在。Tikhomirov等<sup>[6,7]</sup>先后对光纤激光传感阵列规模的影响因素进行了深入研究,均指出:相干坍塌是限制阵列规模的重要原因。相干坍塌作为一种外在干扰,直接导致DFB光纤激光器的工作线宽极大展宽,相干性急剧恶化,系统的频率噪声及相位噪声极大增加。因此,对光纤激光器相干坍塌现象进行深入的检测与研究具有十分重要的意义。

文献[8]指出,DFB光纤激光器受瑞利散射限制的传导光纤极限长度为135~200 m,而文献[9]报道30 m传导光纤的瑞利散射会使DFB光纤激光传感阵列发生相干坍塌。文献[10]指出,当采用980 nm激光抽运时,DFB光纤激光器传导光纤的最大长度为40~50 m;当采用1480 nm激光抽运时,传导光纤的长度

收稿日期:2012-11-16;收到修改稿日期:2012-11-20;网络出版日期:2013-01-11

作者简介:熊水东(1974—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感和光电信号处理技术等方面的研究。

E-mail: xsdnudt@163.com

\*通信联系人。E-mail: liusenabei@163.com

可达 135~250 m。上述研究成果对于 DFB 光纤激光传感阵列的相干坍塌特性研究具有广泛的理论和现实意义,但大多数研究较为笼统。

为了对相干坍塌进行准确有效的测量与分析,必须能有效辨别激光器发生相干坍塌前后工作纵模和输出频率的变化,准确测定相干坍塌的阈值条件。本文针对这一要求通过法布里-珀罗(F-P)扫描干涉仪观测 DFB 光纤激光器的工作纵模,同时采用非平衡光纤迈克耳孙干涉仪将光纤激光器的频率噪声转换为干涉仪的相位噪声,通过对照检测判断 DFB 光纤激光器的工作状态,并对瑞利散射和菲涅耳端面反射导致 DFB 光纤激光器产生的相干坍塌现象进行了有效的测量与分析。

## 2 相干坍塌的复合腔模型

国内外对激光器受腔外反馈光影响的研究主要针对半导体激光器<sup>[11~13]</sup>,分析方法主要有速率方程模型和复合腔模型。为使物理图像简单明了,本文采用复合腔模型分析腔外反馈光对 DFB 光纤激光器的影响。将 DFB 谐振腔等效为由反射系数为  $r_1$ 、 $r_2$  的两个端面构成的 F-P 腔, $r_1$  和  $r_2$  分别对应相移光栅相移区两侧光栅的峰值反射率,将腔外反馈光看作激光器的外腔端面反射光,反射系数为  $r_{\text{ext}}$ ,外腔长度为  $d$ 。外腔与原谐振腔一起构成一个总腔长为  $L+d$  的复合腔,复合腔的光学结构示意图如图 1 所示<sup>[12~14]</sup>。

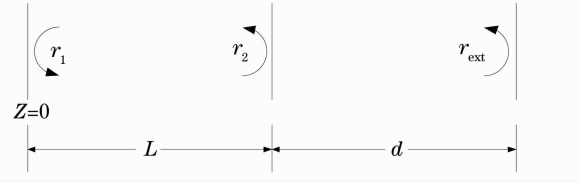


图 1 DFB 光纤激光器的复合腔模型示意图

Fig. 1 Composite-cavity model of DFB fiber laser

将外腔反馈等效到原谐振腔的端面上,整个复合腔等效为一个腔长为  $L$ 、端面反射率分别为  $r_1$  和  $r_{2e}$  的谐振腔, $r_{2e}$  的表达式如下:

$$r_{2e} = r_2 + Tr_{\text{ext}} \exp(-i2\pi\nu\tau_e) = r_2 [1 + Tr_{\text{ext}} \cos(2\pi\nu\tau_e)/r_2] - iTr_{\text{ext}} \sin(2\pi\nu\tau_e), \quad (1)$$

式中  $T$  为透射率, $\tau_e$  为外腔反馈时延。由于外腔介质为传导光纤,通常不存在高反射端面,外腔反馈系数通常较小, $r_2 r_{\text{ext}} \ll 1$ ,故不考虑多次反射。将激光器的初始输出频率记为  $\nu_0$ 。当反馈光注入到谐振腔时,会使阈值增益、输出光频和有效折射率发生改变,从而产生一个附加相移<sup>[13]</sup>:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi L}{c} \left[ \nu_0 \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n} (n - n_{\text{th}}) + \left( n_{\text{eff}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \nu} \nu_0 \right) (\nu - \nu_0) \right] + \varphi_r = \frac{\tau_L}{\tau_e} \left[ 2\pi\tau_e (\nu - \nu_0) + \frac{T}{r_2} \frac{\tau_e}{\tau_L} \sqrt{1 + \alpha^2} r_{\text{ext}} \sin(2\pi\nu_0\tau_e + 2\pi\Delta\nu\tau_e - \theta_a) \right], \quad (2)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为光纤的等效折射率, $n_{\text{th}}$  为无反馈时的阈值载流子密度, $\tau_L$  为谐振腔周程时延, $\alpha$  为线宽增强因子, $\theta_a = \arctan \alpha$  为线宽增强因子的幅角, $\varphi_r$  为外腔端面处的相移。复合腔应当同时满足如下的增益放大条件和相干相长相位条件:

$$r_1 |r_{2e}| \exp[(g_c - \gamma)L] = 1, \quad (3)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2L + \varphi_r = \frac{4\pi n_{\text{eff}} L}{c} + \varphi_r = 2m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \text{ i. e. , } \Delta\varphi = 0, \quad (4)$$

式中  $g_c$  为复合腔的阈值增益, $\gamma$  为谐振腔的损耗系数。联立(2)~(4)式,可知激光器产生的光频偏移必须满足如下关系:

$$2\pi\tau_e (\nu - \nu_0) = \tau_e \Delta\omega = -\frac{T}{r_2} \frac{\tau_e}{\tau_L} \sqrt{1 + \alpha^2} r_{\text{ext}} \sin(\Delta\omega\tau_e + 2\pi\nu_0\tau_e - \theta_a). \quad (5)$$

将反馈因子定义为<sup>[12]</sup>

$$C = \frac{T}{r_2} \frac{\tau_e}{\tau_L} \sqrt{1 + \alpha^2} r_{\text{ext}}. \quad (6)$$

DFB 光纤激光器谐振腔的端面反射率为  $R = \tanh^2(\kappa L)$ , $\kappa$  为光纤光栅的耦合系数, $L$  为光栅的长度,则  $r_2 = R^{1/2}$  为反射率。由于构成谐振腔的光栅为超高反射光栅, $r_2 \approx 1$ , $\kappa L \geq 6$ ,  $T \approx 4\exp(-\kappa L)$ 。 $\tau_e/\tau_L = d/L_L$ , $L_L$  为激光器的有效腔长。考虑到 DFB 光纤激光器的光栅为相移光栅,令相移区两侧的光栅长度分别为  $L_1$  和  $L_2$ , $L_{\text{phase}}$  是相移区的长度,则  $\tanh(\kappa L_1) = \tanh(\kappa L_2) \approx 1$ , $L_L = [\tanh(\kappa L_1) + \tanh(\kappa L_2)]/2\kappa + L_{\text{phase}} \approx$

$1/\kappa, \tau_e/\tau_L \approx \kappa d$ 。将各个参数代入(6)式,可以得到 DFB 光纤激光器产生的频率偏移为

$$\Delta\omega = \frac{C}{\tau_e} \text{Im}[\exp(-2ik_B d - i\tau_e \Delta\omega + i\theta_a)], \quad (7)$$

$$C = 4|\kappa| \exp(-\kappa L) \sqrt{1 + \alpha^2 r_{\text{ext}}} d, \quad (8)$$

式中  $k_B = W_B/C_e$  为布拉格波数,  $W_B$  为光纤光栅布拉格波长对应的频率。

当  $C < 1$  时, (8) 式存在唯一解, 表明 DFB 光纤激光器在弱反馈下虽然发生了频率偏移, 但仍能保持稳定的单纵模输出。当  $C \geq 1$  时, (8) 式存在一个以上的数值解, 说明单纵模分裂成了多个外腔模, 由于模式竞争, 使激光器的频率噪声和强度噪声增大, 此时就出现了相干坍塌。

令  $C = 1$ , 由(7)式可以得到激光器发生相干坍塌时的阈值传输光纤长度为

$$d = \exp(\kappa L) / (4|\kappa| \sqrt{1 + \alpha^2 r_{\text{ext}}}). \quad (9)$$

实验中采用的 DFB 光纤激光器的工作波长为 1530.28 nm, 谐振腔长度为 40 mm, 光纤的有效折射率取 1.456。根据谐振腔的透射谱, 测得峰值反射率为 -37 dB, 结合透射率公式  $T = 4\exp(-\kappa L)$ , 估算出  $\kappa \approx 150 \text{ m}^{-1}$ 。对于掺铒光纤,  $\alpha$  正比于  $P_s/P_{\text{sat}}$ , 其中  $P_s$  为激光器的输出功率, 与激光器的工作状态有关,  $P_{\text{sat}}$  为激光器的饱和功率, 与增益光纤的性质有关。实验中所用的掺铒光纤饱和功率约为  $8 \mu\text{W}$ , 激光器在抽运功率为 63 mW 时的输出约为  $50 \mu\text{W}$ 。根据  $P_s/P_{\text{sat}} = 20$  时  $\alpha \approx 3$ , 在计算中取  $\alpha \approx 1.5$ ,  $\theta_a = \arctan 1.5 = 0.9828$ 。标准通信光纤的瑞利散射系数取 -72 dB/m, 图 2 给出了相干坍塌阈值长度随外腔反射率的变化曲线和瑞利散射与光纤长度的关系曲线<sup>[15]</sup>, 二者的交点处即为受光纤瑞利散射限制的阈值长度, 可以看出该长度为 130 m, 与文献[8]得出的结论一致。

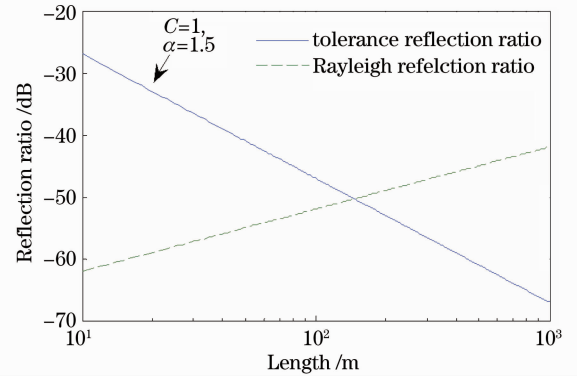


图 2 瑞利散射累计引发相干坍塌效果图  
Fig. 2 Results of coherence collapse due to Rayleigh backscattering

如果传导光纤的初始长度为 130 m 和 300 m, 可以得到激光器的频移与传导光纤长度间的关系如图 3 所示。仿真结果表明, 当初始外腔长度为 130 m 时, 由于相干坍塌尚未发生, 此时激光器工作于单模状态。当外腔长度增加至 300 m 时, 对应于每一个外腔长度, 激光器都存在多于一个的频率偏移, 证明此时其单模运行状态已被分裂成了多纵模。

当外腔为端面反射时, 可将其近似为菲涅耳反射, 反射系数为  $r_{\text{ext}} = (1.456 - 1)/(1.456 + 1) = 0.186$ , 反

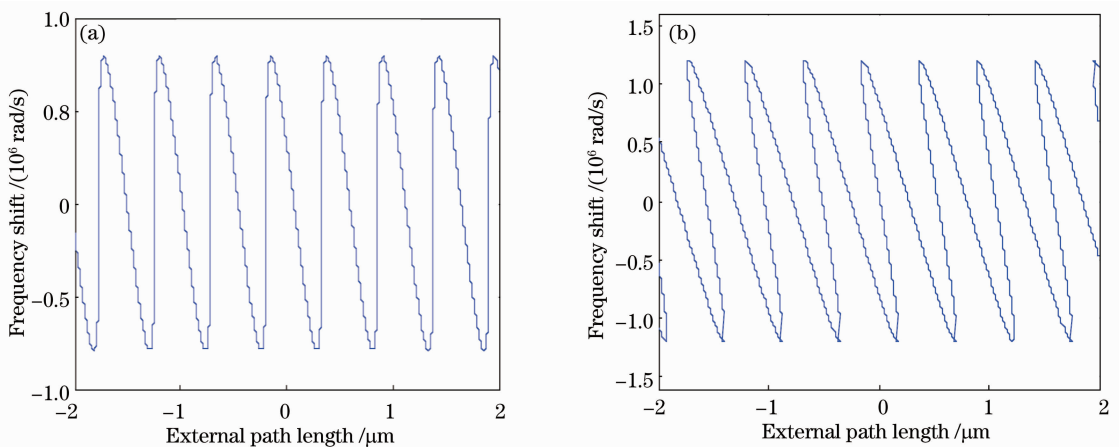


图 3 DFB 光纤激光器的频移与传导光纤长度间的关系。(a)  $d = 130 \text{ m}$ ; (b)  $d = 300 \text{ m}$

Fig. 3 Relation curve between the frequency shift of DFB fiber laser and the external path length. (a)  $d = 130 \text{ m}$ ; (b)  $d = 300 \text{ m}$

射率为  $R = r_{\text{ext}}^2 = 0.0345$ , 计算得到光纤激光器不发生相干坍塌时的阈值外腔长度为 2.01 m。

### 3 实验装置及结果分析

研究中构建了 DFB 光纤激光器相干坍塌检测系统, 系统光路如图 4 所示。波分复用器输出的激光通过一个 50:50 耦合器分为两束, 一束注入 F-P 扫描干涉仪测量激光器的工作纵模, 另一束通过臂差为 15 m 的非平衡迈克耳孙干涉仪将频移转换为相位变化。F-P 扫描干涉仪的工作波长范围为 1400~1600 nm, 自由光谱范围(FSR)为 1.5 GHz, 最小可分辨精度为 7.5 MHz。系统采用相位生成载波(PGC)技术来获得高分辨率和高稳定性解调。DFB 光纤激光器和解调干涉仪均采用隔离封装, 以消除环境影响, 系统测得的信号即为相位噪声本底, 能够反映激光器的频率波动。

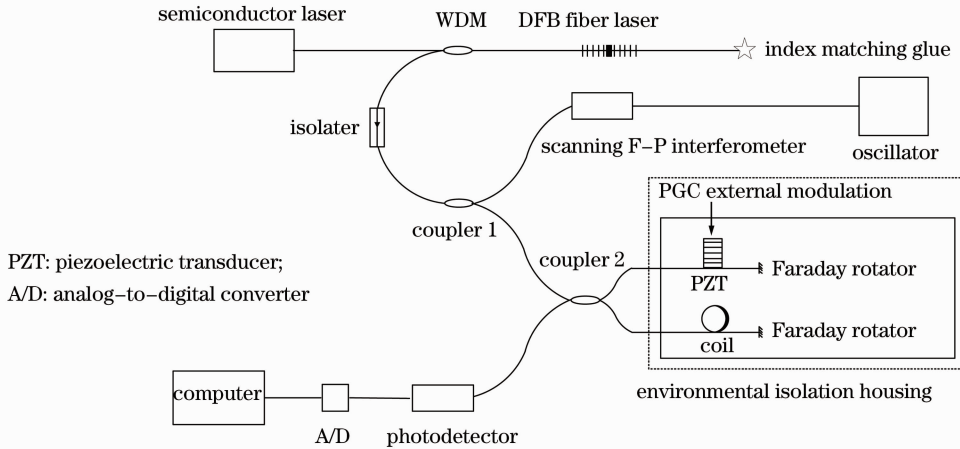


图 4 相干坍塌测试系统框图

Fig. 4 Schematic diagram of coherence collapse measurement system

首先测量瑞利散射引起的相干坍塌。光纤激光器的尾纤长度为 0.6 m, 逐渐增加激光器后传导光纤的长度, 测量不同长度下系统的相位噪声, 直至发生相干坍塌, 测试结果如图 5 所示。

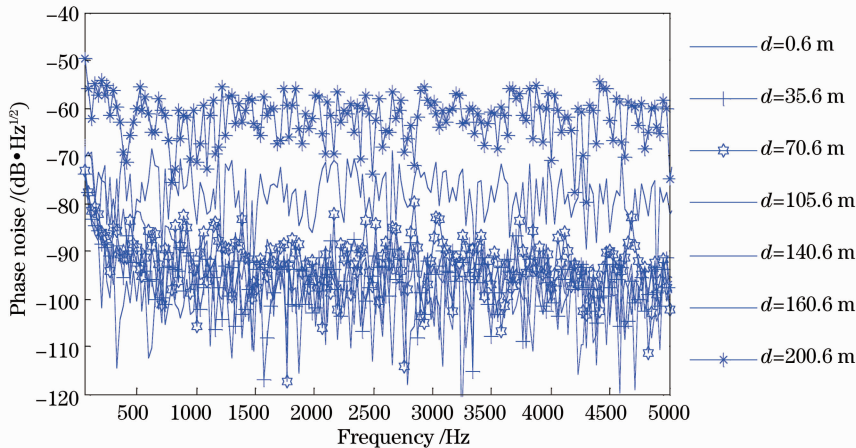


图 5 瑞利散射条件下 DFB 光纤激光器相位噪声测试结果

Fig. 5 Phase noise level of DFB fiber laser sensor due to Rayleigh backscattering

相位噪声测试结果表明, 当传导光纤长度小于 140.6 m 时, 随着光纤长度的增加, 激光器的相位噪声有所上升, 但整体噪声水平低于  $-90 \text{ dB/Hz}^{1/2}$  (1 kHz 处)。光纤长度继续增大, 激光器的相位噪声开始显著上升。当光纤长度为 160.6 m 时, 相位噪声上升至约  $-75 \text{ dB/Hz}^{1/2}$  (1 kHz 处); 当光纤长度为 200.6 m 时, 相位噪声上升至约  $-60 \text{ dB/Hz}^{1/2}$  (1 kHz 处)。对比图 6 中光纤长度分别为 140.6 m 和 160.6 m 时的干涉仪输出光强可以看出, 当光纤长度为 160.6 m 时, 干涉仪的输出光强不稳定。

在进行相位噪声测试的同时测量 DFB 光纤激光器的工作纵模, 图 7 是  $d=0.6 \text{ m}$  和  $d=160.6 \text{ m}$  时的

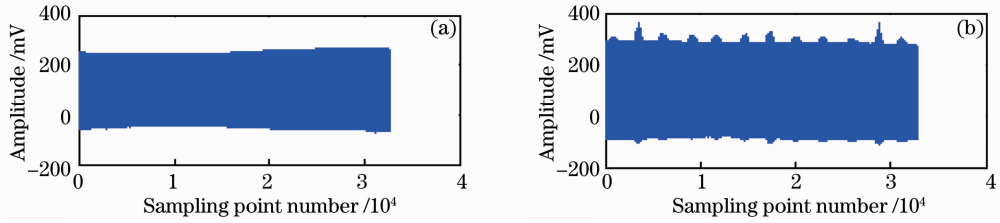


图6 瑞利散射条件下干涉仪输出光强测试结果图。(a)  $d=140.6\text{ m}$ ; (b)  $d=160.6\text{ m}$

Fig. 6 Intensity output of MI interferometer due to Rayleigh backscattering. (a)  $d=140.6\text{ m}$ ; (b)  $d=160.6\text{ m}$

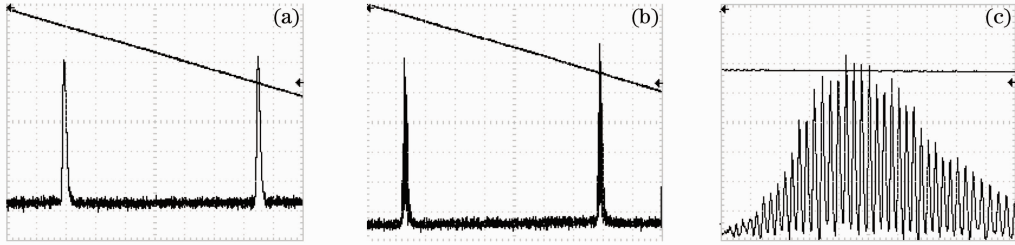


图7 瑞利散射条件下光纤激光器的纵模运行测试图。(a)放大前,  $d=0.6\text{ m}$ ;

(b)放大前,  $d=160.6\text{ m}$ ; (c)放大后  $d=160.6\text{ m}$

Fig. 7 Longitudinal-mode operation of DFB fiber laser due to Rayleigh backscattering. (a) Before amplification,  $d=0.6\text{ m}$ ; (b) before amplification,  $d=160.6\text{ m}$ ; (c) after amplification,  $d=160.6\text{ m}$

测量结果。通过对比可以看出,160 m 传导光纤的引入使激光器的单纵模变成了多纵模,清晰地反映了外光反馈引起纵模分裂的过程。上述实验结果表明,当  $d=160.6\text{ m}$  时,光纤激光器发生了相干坍塌,与仿真结果较为接近,二者的差异可能由传导光纤瑞利散射的差异引起。

端面反射引起相干坍塌的测试与瑞利散射条件下的相干坍塌测试类似。DFB 光纤激光器的初始尾纤长度为  $0.6\text{ m}$ ,其瑞利散射可以忽略,测得激光器的工作模式如图 8(a)所示。在光纤激光器的尾纤后接上  $2\text{ m}$  单模光纤,此时激光器的外腔长度为  $2.6\text{ m}$ 。用光纤切割刀在光纤末端切出菲涅耳反射端面,测得光纤激光器的工作模式如图 8(b)所示。

当激光器的尾纤长度为  $0.6\text{ m}$  时,在一个 FSR 内只有一个模式存在,光纤激光器保持稳定的单纵模运行状态。 $1.5\text{ GHz}$  的 FSR 对应的显示时间约为  $6.5\text{ ms}$ ,工作模式的半峰全宽对应的显示时间约为  $120\text{ }\mu\text{s}$ ,由此估算光纤激光器的线宽约为  $1.5\text{ GHz} \times 120\text{ }\mu\text{s} / 6.5\text{ ms} = 27.7\text{ MHz}$ 。当尾纤长度为  $2.6\text{ m}$  时,激光器的纵模输出不稳定,出现间歇性的脉冲簇,细小模式之间的时间间隔约为  $30\text{ }\mu\text{s}$ ,估算出分裂模式的频率间隔约为  $1.5\text{ GHz} \times 30\text{ }\mu\text{s} / 6.5\text{ ms} = 6.9\text{ MHz}$ ,小于 F-P 腔扫描干涉仪的最小可分辨精度。测试结果证明了模式分裂的存在,但不能测量准确的模式分裂频率间隔,可以采用激光器拍频检测方法对模式分裂的大小进行精确测量。采用相位噪声表征方法检测端面反射条件下相干坍塌的测试情况与瑞利散射条件下的相干坍塌测试类似,结果与模式分裂表征方法结果一致。

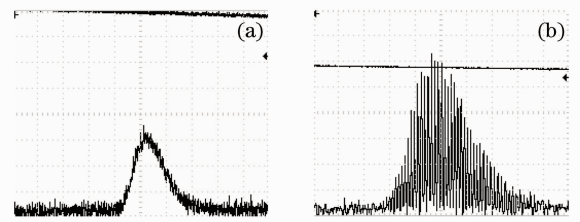


图8 端面反射条件下光纤激光器的纵模运行测试图。(a)  $d=0.6\text{ m}$ ; (b)  $d=2.6\text{ m}$

Fig. 8 Longitudinal-mode operation of DFB fiber laser due to facet reflection. (a)  $d=0.6\text{ m}$ ; (b)  $d=2.6\text{ m}$

## 4 结 论

本文对 DFB 光纤激光器的相干坍塌进行了理论分析,并采用模式分裂表征方法和相位噪声表征方法对瑞利散射和端面反射条件下 DFB 光纤激光器的相干坍塌现象同时进行对照检测,实验测试结果与采用复合腔模型分析结果保持一致,为检测相干坍塌和评价 DFB 光纤激光器的工作稳定性能提供了有效的测试手



段。同时得出结论:瑞利散射条件下DFB光纤激光器发生相干坍塌的传导光纤阈值长度小于200 m,这与文献[5]的结果相吻合。

### 参 考 文 献

- 1 D. J. Hill, P. J. Nash, D. A. Jackson *et al.*. A fiber laser hydrophone array [C]. *SPIE*, 1999, **3860**: 55~66
- 2 Scott Foster, Alexei Tikhomirov, Mark Englund *et al.*. A 16 channel fibre laser sensor array[C]. ACOFT/AOS2006, 2006. 40~42
- 3 Chen Jialin, Liang Liping, Chen Bai *et al.*. Study on postprocess of  $\lambda/4$ -shifted DFB Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 581~584  
陈嘉琳, 梁丽萍, 陈 柏 等. 掺 Yb 相移分布反馈光纤激光器的后期制作与研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(7): 581~584
- 4 Liu Haitao, Chen Jianping, Chen Xiangfei *et al.*. Fabrication of distributed feedback Bragg fiber laser on regular Er-doped fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 873~876  
刘海涛, 陈建平, 陈向飞 等. 低掺杂铒纤上分布反馈布拉格光纤激光器的制作[J]. 中国激光, 2006, **33**(7): 873~876
- 5 Li Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang *et al.*. Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber grating hydrophone [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0305005  
李东明, 陈 军, 葛辉良 等. 高灵敏度加速度抵消型分布反馈有源光纤光栅水听器研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(3): 0305005
- 6 Alexei Tikhomirov, Scott Foster. DFB FL sensor multiplexing noise [C]. ACOFT/AOS2006, 2006. 60~62
- 7 Geoffrey A. Cranch, Gordon M. H. Flockhart, Clay K. Kirkendall. Distributed feedback fiber laser strain sensors [J]. *IEEE Sensors J.*, 2008, **8**(7): 1161~1172
- 8 Erlend Rønnekleiv, Oliver Haderer, Guillaume Vienne. Stability of an Er-Yb-doped fiber distributed-feedback laser with external reflections[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(9): 617~619
- 9 Yue-Feng Wu, Fang Li, Tuan-Wei Xu *et al.*. External optical feedback induced noise in DFB fiber laser sensor system[J]. *J. Electronic Science and Technology of China*, 2008, **6**(4): 402~404
- 10 Zhihao Chen, Junhong Ng. Long distance (2.1 km) DFB fibre laser hydrophone system[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 750343
- 11 F. Grillot, B. Thedrez, O. Gauthier-Lafaye *et al.*. Coherence-collapse threshold of 1.3- $\mu$  m semiconductor DFB lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1): 9~11
- 12 Klaus Peterman. External optical feedback phenomena in semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1995, **1**(2): 480~489
- 13 Kun Zhang. Theoretical and Experimental Investigation on Optical Feedback of DFB Semiconductor Laser[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007. 17~21  
张 鲲. DFB激光器外腔反馈的理论和实验研究[D].北京:北京邮电大学, 2007. 17~21
- 14 Liu Wen, Ma Lina, Yang Huayong. Coherence-collapse characteristics of single-mode DFB fiber laser sensors with external optical feedback[C]. *SPIE*, 2011, **8199**: 819905
- 15 Lina Ma. Fiber Laser Hydrophone[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. 129~130  
马丽娜. 光纤激光水听器技术[D].长沙:国防科学技术大学, 2010. 129~130