

分布反馈式光纤激光器线宽特性及其展宽基础研究*

倪家升¹⁾ 赵燕杰¹⁾ 王昌¹⁾ 彭刚定¹⁾³⁾ 刘统玉¹⁾ 常军^{2)†} 孙志慧¹⁾

1) (山东省科学院激光研究所, 山东省光纤传感技术重点实验室, 济南 250014)

2) (山东大学信息科学与工程学院, 济南 250010)

3) (新南威尔士大学电子工程与通信学院, 澳大利亚悉尼 2032)

(2011年5月31日收到; 2012年3月1日收到修改稿)

针对分布反馈式光纤激光器 (DFB-FL) 线宽特性进行了深入研究. 通过理论推导和实验验证, 分析了自脉动、相移光栅、激射窗口宽度以及外界环境扰动等因素对 DFB-FL 线宽的展宽作用. 进一步提出了压缩 DFB-FL 的线宽有效方法和途径, 给出了自注入锁模方式下对 DFB-FL 线宽压缩的对比实验结果, 将 DFB-FL 的线宽从 35 kHz 压缩到了 10 kHz.

关键词: 分布反馈式光纤激光器, 自注入锁模, 线宽特性

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.81.-i

1 引言

分布反馈式光纤激光器 (DFB-FL) 具有单模工作稳定、线宽窄、相干长度长、尺寸小、易组网、可波分复用、结构稳定等特点, 在光通信、光谱学以及传感领域具有广泛的应用和很大的发展空间. 1994年 Kringlebotn 等^[1] 首次报道了通过加热光栅引入相移的方法制作出了 DFB-FL, 1995年 Asseh 等^[2] 通过在光栅中引入永久相移制作出了 DFB-FL. 近几年关于 DFB-FL 的研究逐步深入和多样化^[3-10], 国内的中国科学院上海光学精密机械研究所、北京交通大学、中国电子科技集团公司第二十三研究所、国防科学技术大学以及中国科学院半导体研究所等单位^[11-17] 也相继开展了此类研究.

随着对 DFB-FL 应用潜力的发掘和对其研究的深入, 近几年的研究重点由 DFB-FL 基本原理和制作工艺研究逐渐转向提高器件性能的机理和方法研究, 特别是 DFB-FL 窄线宽特性的研究尤为引人关注^[18,19]. 虽然国内外对 DFB-FL 的机理、制作方法以及检测方法均有不少研究和报道, 但是对

于 DFB-FL 窄线宽产生机理、线宽压缩技术等方面的研究依然比较欠缺. 而 DFB-FL 的优越性主要体现在它的窄线宽特性上, 因此, 研究 DFB-FL 窄线宽形成机理、改进器件制作工艺、获得线宽更窄的高性能 DFB-FL, 对于提高 DFB-FL 性能、拓宽其应用领域具有重要的学术意义.

本文从理论上分析了引起 DFB-FL 线宽展宽的因素, 给出了环境噪声、激射窗口宽度以及自脉动等因素引起线宽展宽的理论模拟结果和实验结果, 并采用自注入锁模方式实现了线宽的大幅度压缩.

2 DFB-FL 及其线宽展宽的基本原理

DFB-FL 是在一段掺杂光纤上制作一个相移光栅, 利用抽运提供能量, 通过相移光栅形成谐振腔和选频锁模, 从而实现窄线宽激光的输出.

图 1 所示为 DFB-FL 的结构, 通过耦合波理论^[20] 可以证明这种结构在光栅中心波长处可满足激光激射条件. 图 2 所示为相移光栅的反射谱, 相移光栅波长分布中心的狭缝满足激光激射条件并

* 国家自然科学基金 (批准号: 60977058) 和山东省杰出青年科学基金 (批准号: JQ200819) 资助的课题.

† E-mail: njsh51@163.com

作为激光输出窗口 (以下称为激射窗口).

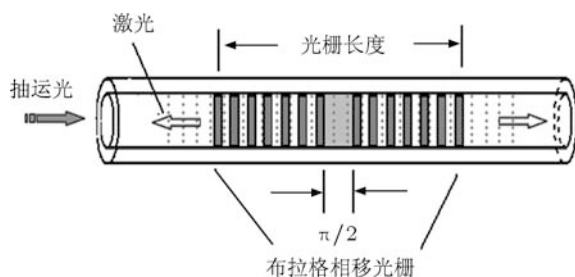


图1 DFB-FL 结构示意图

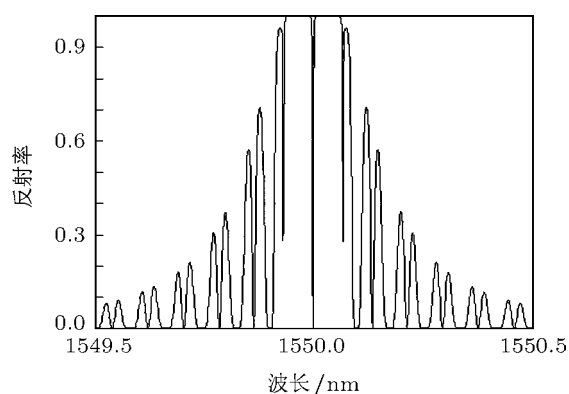


图2 相移光栅的反射谱

DFB-FL 在抽运光激励下的输出光场 $E(t)$ 可以认为是一个振幅稳定、相位有扰动的准单色电磁场, $E(t)$ 可表示为

$$E(t) = E_0 \exp \{j[\omega_0 t + \varphi(t)]\}, \quad (1)$$

式中, E_0 为光场振幅, ω_0 为光场的中心频率, $\varphi(t)$ 表示相位的随机波动. 引入光场的自相关函数 $G_E^{(1)}(\tau)$, 定义为

$$\begin{aligned} G_E^{(1)}(\tau) &= \langle E^*(t)E(t+\tau) \rangle \\ &= \langle \exp[j\Delta\varphi(t, \tau)] \rangle \exp(j\omega_0\tau), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\Delta\varphi(t, \tau) = \varphi(t, \tau) - \varphi(t)$ 为相位抖动, 表示从时间 t 到 $t+\tau$ 相位的随机变化. 大多数情况下, 该相位的随机变化可以假设为零均值的平稳高斯随机分布, 其概率密度函数可以表示为

$$\begin{aligned} W[\Delta\varphi(\tau)] &= \frac{1}{[2\pi \langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle]^{1/2}} \\ &\times \exp \left[-\frac{\Delta\varphi^2(\tau)}{2 \langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

这里 $\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle$ 与瞬时角频率波动谱 $S_\varphi(\omega)$ 相关联, 可以表示为

$$\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle = \frac{\tau^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2} \right] S_\varphi(\omega) d\omega. \quad (4)$$

利用关系式

$$\langle \exp[\pm j\Delta\varphi(t, \tau)] \rangle = \exp \left[-\frac{1}{2} \langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle \right],$$

光场的自相关函数可以表示为

$$G_E^{(1)}(\tau) = \exp \left[-\frac{1}{2} \langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle \right] \exp(j\omega_0\tau). \quad (5)$$

考虑到激光器工作于阈值以上时, 量子相位波动对它的瞬时角频率波动谱 $S_\varphi(\omega)$ 的影响可以看成是平坦的, 因此 $\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle$ 可以看作随延迟时间线性变化, 即

$$\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle = 2\gamma |\tau|, \quad (6)$$

式中 2γ 是对 (5) 式作傅里叶变换后得到的洛伦兹型激光场 $S_E(\omega)$ 的光谱半高全宽 (FWHM), 实际上它代表了激光的线宽. 根据 Wiener-Khinchine 定理, 对 (5) 式作傅里叶变换可得

$$S_E(\omega) = E_0^2 \frac{\gamma/\pi}{\gamma^2 + (\omega - \omega_0)^2}. \quad (7)$$

(7) 式将激光器输出光场的光谱与光场的随机相位抖动联系起来, 其中 2γ 可以由 Schawlow-Townes 激光器的线宽公式给出, 即

$$2\gamma = v_g^2 \frac{h\nu g n_{sp} \alpha_m}{4P_0} (1 + \beta^2), \quad (8)$$

式中, v_g 为增益介质中光的群速度, ν 为电磁波频率, h 为普朗克常量, $h\nu$ 为光子能量, n_{sp} 为自发辐射因子, α_m 为腔镜的损耗, β 为线宽修正因子, P_0 为输出光功率.

3 DFB-FL 线宽展宽因素及其压缩方法

由 (8) 式可知, 激光场光谱的 FWHM 2γ 受到 n_{sp} , α_m 等因素的影响, 而实验也证明 DFB-FL 的线宽特性受到自发辐射、光栅特性、激射窗口以及外界环境扰动等多个因素的综合影响.

由 (1) 式可知, $\varphi(t)$ 是直接引起激光非单频的主要原因, 任何引起相位抖动的因素均会引起激光器线宽的加宽. 激光器运行过程中除了自身原因会导致激光的相位发生改变外, 外界的振动、温度等物理量的改变对激光器线宽也会产生较大影响. 分别将激光器放置于噪声较小的隔音箱内、普通室内以及噪声较大的室外三种环境下, 通过声强计测得这三种环境的噪声强度分别为 45, 52, 60 dB, 用延迟零差法^[21] (延迟光纤长度为 25 km) 测量三

种环境下的线宽, 所得结果如图 3 所示. 测量得到这三种环境下的线宽曲线均符合洛伦兹线型, 因此对测量值进行洛伦兹曲线拟合后可以获得更加精确的结果. 图 3 同时给出了三种情况下的洛伦兹拟合曲线, 最终得出三种噪声环境下的激光线宽分别为 12.06, 17.36, 26.24 kHz (图 4). 由图 4 可以明显地看出, 随着外界环境噪声的增加, 其线宽值也在增加, 变化率大约为 0.95 kHz/dB. 由此可知, 环境噪声对于 DFB-FL 的线宽影响很大.

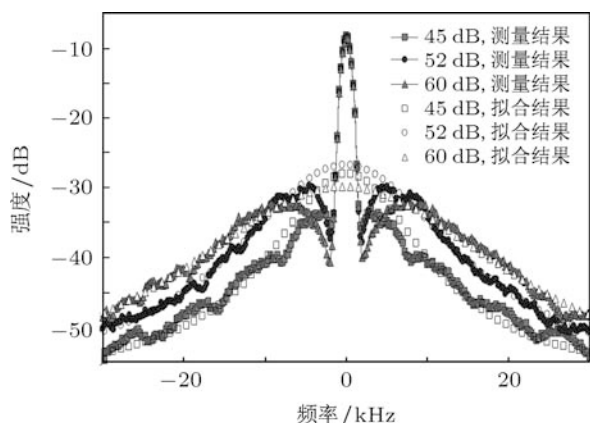


图 3 在 45, 52 和 60 dB 噪声环境下线宽展宽的测量结果及拟合结果

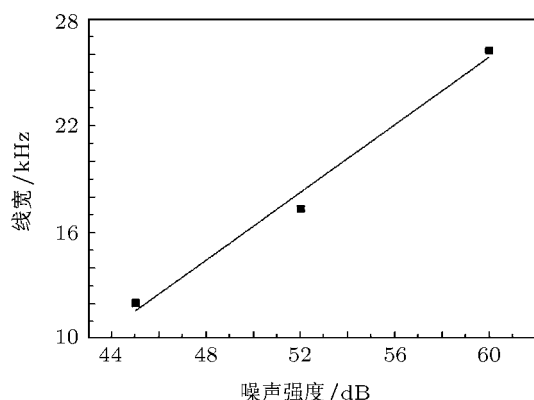


图 4 在 45, 52 和 60 dB 噪声条件下线宽的测量结果

相移光栅中心激光窗口宽度是另一个引起线宽展宽和激光不稳定的因素. 如果激光窗口不够窄、窗口平滑度不够理想, 就会导致模式竞争加剧等问题, 甚至有跳模现象存在, 造成实际输出的激光线宽展宽.

激光器运行时, 由于受激辐射的放大作用, 使处于激光上能级的粒子数不断被消耗, 受激辐射越强, 这种消耗速率就越大. 因此, 反转粒子数和增益系数将随光辐射强度的增大而逐渐下降, 当光辐射强度达到某一值时, 激光介质上下能级的粒子数变

化达到动态平衡, 这时激活介质的增益系数恒等于阈值, 而激光器内受激辐射的光强也趋于一个定值. 对于稳定运行的激光器, 激光输出强度决定于这个定值和输出透射率的乘积, 对于 DFB-FL 而言即为激光窗口的透射率.

自发辐射与受激辐射都向激光系统腔模馈送能量, 稳态时, 受激辐射与自发辐射之和正好补偿损耗的功率. 阈值条件为

$$G_{ASE} + G_{SE} = S_{loss}, \quad (9)$$

式中, G_{ASE} 为自发辐射增益, G_{SE} 为受激辐射增益, S_{loss} 为腔损耗. 此处腔损耗主要由相移光栅决定, 激光器工作时的腔损耗主要集中在激光窗口的透射率上. 此外, 激光窗口还起到激光器选模窗的作用. 因此, 相移光栅激光窗口对于线宽展宽具有重要的影响.

图 5 给出了根据耦合模理论仿真得到的不同折射率调制深度下相移光栅的透射谱. 从图 5 可以看出, 改变折射率调制深度能够获得不同宽度的 DFB-FL 激光窗口. 当折射率调制深度从 0.00002 变化到 0.00012 时, 计算得到的激光窗口 3 dB 带宽如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 随着折射率调制深度的增加, 其 3 dB 带宽逐渐减小. 激光窗口宽度的压缩有利于获得稳定的单模运转状态, 由于激光窗口宽度远小于激光的纵模间隔, 因此激光器产生跳模的概率大大降低. 由此可知, 改变相移光栅的折射率调制深度可以改变其激光窗口的宽度, 从而可有效压缩激光的线宽. 较高的边模抑制比加上更加光滑狭窄的激光窗口可以有效抑制模式竞争引起的波动, 从而有利于降低 DFB-FL 的噪声, 达到有效压缩线宽的目的.

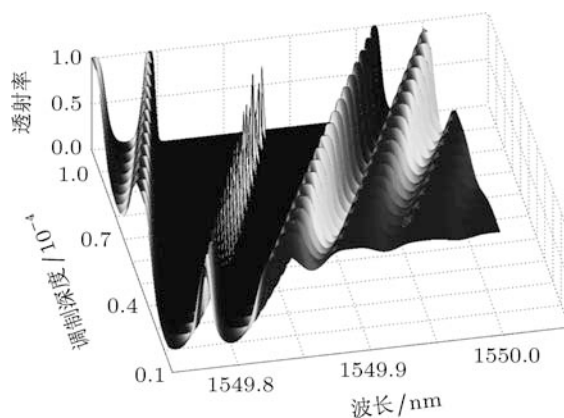


图 5 相移光栅透射谱随折射率调制深度的变化

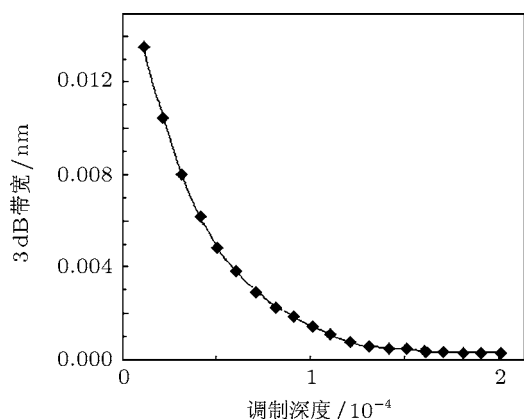


图6 DFB-FL 激光窗口的 3 dB 带宽随折射率调制深度的变化

石英光纤是由玻璃晶格 $(\text{SiO}_4)^{2-}$ 构成的四面体网状结构, 这种四面体的网状结构导致 $(\text{SiO}_4)^{2-}$ 存在较大的空间, 而 Er^{3+} 在玻璃晶格中容易聚集形成团簇 [22]. 聚集状态使 Er^{3+} 一部分聚集成团形成离子对, 另一部分通过偶极 - 偶极相连. 由于 Er^{3+} 离子对在上能级的寿命极短, 不可能完全被抽运, 这样, 离子对会产生对信号光的附加吸收, 使系统不稳定, 从而导致自脉动产生. 自脉动的产生会对激光输出功率产生巨大影响, 形成强度噪声, 而且这种功率的波动同样会引起激光器输出波长的扰动, 即引起线宽增加. 图 7 所示为激光器的输出强度曲线. 从图 7 可以看出, 经过探测器光电转换后产生了 350 mV 的直流信号, 并伴有 60 mV 左右的交流分量, 即为自脉动信号. 从图 7 还可以明显看出, 激光器由于自脉动产生了频率为 100 kHz 左右的功率波动.

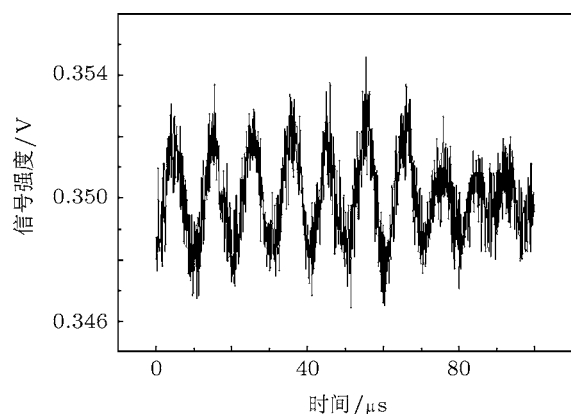


图7 DFB-FL 自脉动时域信号曲线

采用环形结构将 DFB-FL 产生的激光重新注入激光器能够有效抑制自脉动. 图 8 所示为 DFB-FL 自注入反馈结构. 选用激光波长为 980 nm 的激

光二极管 (980 LD) 作为 DFB-FL 的抽运源, 980 LD 输出的激光经过波分复用器 (WDM) 进入 DFB-FL 使之发光. DFB-FL 发出前向和后向两个方向的激光, 后向激光经过 WDM 到达 R 点并通过光纤环形器端口 3 输出; 前向激光经过 F 点连接偏振控制器和隔离器并通过光纤环形器到达 R 点, 从而再次经过 WDM 注入到 DFB-FL 中形成自注入反馈.

通过激光自注入可以消除自脉动带来的影响, 降低相位噪声和波长波动, 从而有效抑制自脉动带来的线宽展宽. 分别对自注入前后产生的激光线宽进行对比检测后发现, 注入前输出激光线宽大约为 35 kHz, 而自注入后线宽压缩到了 10 kHz 左右, 检测结果如图 9 所示. 本文实验中给出的自注入结构使得激光线宽压缩到了原线宽的 1/3 左右, 因此自注入方式是一种压缩 DFB-FL 线宽的有效途径.

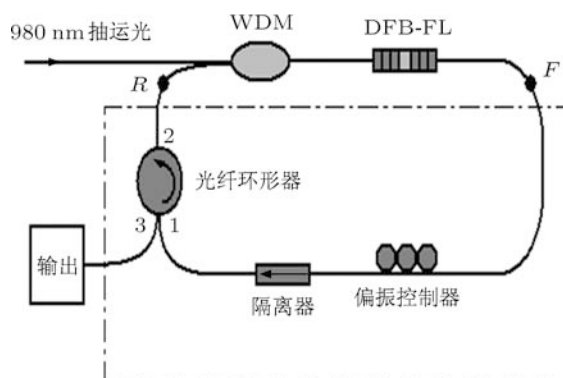


图8 DFB-FL 自注入系统结构示意图

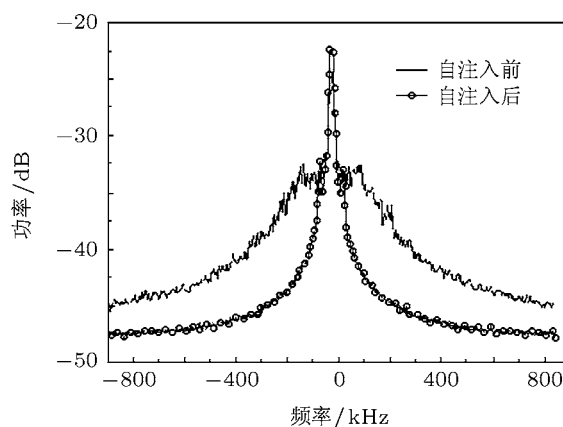


图9 采用自注入前后输出激光的线宽测量结果

4 结论

本文分别从环境噪声、相移光栅特性、激射窗口等方面对 DFB-FL 线宽展宽机理进行了理论

研究和实验验证. 结果表明: 激光器运行环境噪声对激光器线宽会产生很大影响, 外界噪声越大, 线宽越宽. 相移光栅激射窗口的宽度和平滑度也是引起 DFB-FL 线宽展宽的重要原因之一, 在制作激光器时应当特别注意激射窗口的 3 dB 带宽及其平滑度. 对于制作 DFB-FL 的掺杂光纤, 由于掺杂浓度

不均匀容易造成激光器具有较强的自脉动现象, 自脉动除了引起强度噪声的增加外, 也会造成线宽的展宽. 自注入反馈方式是有效压缩 DFB-FL 线宽的途径之一, 本文实验中将 DFB-FL 线宽从 35 kHz 压缩到了 10 kHz 左右, 效果非常明显.

- [1] Kringlebotn J T, Archambault J L, Reekie L, Townsend J E, Vienne G G, Payne D N 1994 *Opt. Lett.* **19** 2101
- [2] Asseh A, Storoy H, Kringlebotn J T, Margulis W, Sahlgren B, Sandgren S, Stubbe R, Edwall G 1995 *Electron. Lett.* **31** 969
- [3] Wang L, Chen B, Chen J L, Chang L P, Li G Y, Sun A, Lin Z Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 217
- [4] Li L, Schülzgen A, Zhu X, Moloney J V, Albert J, Peyghambarian N 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 051111
- [5] Foster S, Tikhomirov A 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 762
- [6] Barmenkov Y O, Kir'yanov A V, Pérez-Millán P, Cruz J L, Andrés M V 2008 *IEEE J. Quantum Electron.* **44** 718
- [7] Ibsen M, Ronnekleiv E, Cowle G J, Zervas M N, Laming R I 2000 *Electron. Lett.* **36** 143
- [8] Pradhan S, Town G E, Grant K J 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1741
- [9] Sun J, Dai Y, Chen X, Zhang Y, Xie S 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2587
- [10] Villanueva G E, Pérez-Millán P, Palací J, Cruz J L, Andrés M V, Martí J 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 254
- [11] Qu R H, Ding H, Zhao H, Chen G T, Fang Z J 1999 *Chin. J. Lasers* **26** 515 (in Chinese) [瞿荣辉, 丁浩, 赵浩, 陈高庭, 方祖捷 1999 中国激光 **26** 515]
- [12] Wang L, Chen B, Chen J L, Chang L P, Li G Y, Sun A, Lin Z Q 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 721
- [13] Fan W, Yang X T, Li X C, Zhu H D 2007 *Opt. Laser Technol.* **39** 1189
- [14] Chen J L, Liang L P, Chen B, Fan W, Qiao Q Q, Xue S L, Lin Z Q 2003 *Chin. J. Lasers* **30** 581 (in Chinese) [陈嘉琳, 梁丽萍, 陈柏, 范薇, 乔启全, 薛绍林, 林尊琪 2003 中国激光 **30** 581]
- [15] Zhang J S, Li T J, Zhao Y C, Wei D P, Jian S S 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 1477 (in Chinese) [张劲松, 李唐军, 赵玉成, 魏道平, 简水生 2000 光学学报 **20** 1477]
- [16] Xue L F, Zhang Q, Li F, Zhou Y, Liu Y L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014213 (in Chinese) [薛力芳, 张强, 李芳, 周燕, 刘育梁 2011 物理学报 **60** 014213]
- [17] Zhu Q, Chen X B, Chen J P, Peng G D 2006 *Opt. Fiber Electr. Cable Appl.* (1) 17 (in Chinese) [朱清, 陈小宝, 陈建平, 彭刚定 2006 光纤与电缆及其应用技术 (1) 17]
- [18] Suzuki A, Takahashi Y, Yoshida M, Nakazawa M 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 1463
- [19] Horak P, Voo N Y, Ibsen M, Loh W H 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 998
- [20] Fu S H, Song G F, Chen L H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1613 (in Chinese) [付生辉, 宋国峰, 陈良惠 2007 物理学报 **56** 1613]
- [21] Wang J W, Dong X P, Zhou J L 2007 *J. Xiamen Univ.* **46** 322 (in Chinese) [王劲文, 董小鹏, 周金龙 2007 厦门大学学报 **46** 322]
- [22] Xu O, Lu S H, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4604 (in Chinese) [许鸥, 鲁韶华, 简水生 2008 物理学报 **57** 4604]

Research on linewidth characteristics and broadening mechanism of distributed feedback fiber laser*

Ni Jia-Sheng¹⁾ Zhao Yan-Jie¹⁾ Wang Chang¹⁾ Peng Gang-Ding¹⁾³⁾
Liu Tong-Yu¹⁾ Chang Jun^{2)†} Sun Zhi-Hui¹⁾

1) (Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province, Laser Institute, Shandong Academy of Science, Jinan 250014, China)

2) (School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250010, China)

3) (School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Sydney 2032, Australia)

(Received 31 May 2011; revised manuscript received 1 March 2012)

Abstract

The linewidth characteristics of distributed feedback fiber laser (DFB-FL) is fully explored in this paper. The linewidth broadening effect of DFB-FL induced by self-pulsation, phase-shifted grating, especially lasing window, external disturbance, etc. are extensively investigated in the paper based on the theoretical derivation and experiment. An effective linewidth compression method is proposed, and a self-injection system of DFB-FL comes up to reduce its linewidth from 35 kHz to less than 10 kHz.

Keywords: distributed feedback fiber laser, self-injection mode-locking, linewidth characteristics

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.81.-i

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60977058) and the Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Shandong Province, China (Grant No. JQ200819).

† E-mail: njsh51@163.com