

文章编号: 0253-2239(2008)07-1323-04

利用光纤激光器光谱边带效应测量光纤色散

叶 辉¹ 徐文成¹ 罗智超¹ 宋创兴¹ 陈伟成¹ 冯 杰² 刘颂豪¹

(¹ 华南师范大学光电子信息技术学院光子信息技术广东省重点实验室, 广东 广州 510006)
² 华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 基于被动锁模光纤激光器中色散波与孤子波的相互干涉产生的光谱边带效应, 提出了一种测量单模光纤色散系数的方法。测量了各级边带中心波长的偏移量, 利用边带偏移量与腔内总色散之间的关系, 得到腔内总色散值。不同长度的同种光纤构成的环形腔, 其总色散值不同, 它与光纤长度的变化斜率即是待测光纤的色散系数。搭建了被动锁模掺铒光纤激光器平台, 在 1560 nm 波段测量了 G. 652 常规单模光纤的色散系数, 实验值为 16 ps/(nm·km), 与典型值 17 ps/(nm·km) 符合得很好。

关键词 光学测量; 飞秒脉冲; 光纤激光器; 边带光谱; 环形腔

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082807.1323

Dispersion Measurement for Optical Fiber in Ring Cavity Using Fiber Laser Sideband Spectrum

Ye Hui¹ Xu Wencheng¹ Luo Zhichao¹ Song Chuangxing¹ Chen Weicheng¹
Feng Jie² Liu Songhao¹

¹ Guangdong Provincial Key Laboratory of Photonic Information Technology, School of Information & Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangdong, Guangzhou 510006, China
² School of Physics & Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangdong, Guangzhou 510006, China

Abstract Based on the sideband spectrum produced by the interference of dispersion wave and soliton wave in the passively mode-locked fiber laser. The wavelength offset from the central wavelength in the sideband spectrum is measured, the total cavity dispersion is obtained with the relation between the sideband offset and the total cavity dispersion. Ring cavities with different lengths of the same type fibers have different dispersions. The slope of the variation of dispersions corresponding to the fiber length is the dispersion coefficient to be measured. The platform of a passively mode-locked fiber laser is built, and the dispersion coefficient of G. 652 fiber has been measured, whose experimental value is 16 ps/(nm·km) that is agrees well with the conventional value of 17 ps/(nm·km).

Key words optical measurement; femtosecond pulse; fiber laser; sideband spectrum; ring cavity

1 引 言

随着 1550 nm 通信窗口的打开, 光纤通信向着远距离、高容量的方向发展, 单模光纤凭借其优良的远距离传输性能, 成为了高质量通信系统中的主要传输媒介。但是单模光纤的一个特性——色散制约

了通信系统向更高的速率发展。由于色散的存在, 光脉冲在沿着光纤传播时会发生展宽, 引起相邻脉冲的相互交叠, 最终导致误码的产生。解决问题的关键, 就是要如何相应地进行色散补偿, 而精确的色散补偿的前提就是色散的准确测量。另外, 在

收稿日期: 2007-11-26; 收到修改稿日期: 2007-12-26

基金项目: 广东省自然科学基金(04010397)资助课题。

作者简介: 叶 辉(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器、高码率光通信等方面的研究。

E-mail: dickson0113@163.com

导师简介: 徐文成(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器及其在高码率光通信系统中应用等方面的研究。

E-mail: xuwch@scnu.edu.cn(通信联系人)。

光纤激光技术研究领域,如何利用色散管理技术获得更短的超短脉冲^[1]和超连续谱输出^[2],也需要精确的色散补偿系统。

目前色散测量中比较成熟的方法有:时延法^[3]、相移法^[4,5]、干涉法^[6]和模场直径法^[7]。此外,近年来还出现了基于光纤中调制不稳定性的脉冲放大法^[8]、基于将相位信息调制成强度信息的 PM-AM 转换法^[9,10]、四波混频法^[11,12]等。以上方法各有其优缺点以及适用的范围。

本文报道的测量方法采用典型的环形腔被动锁模掺铒光纤激光器,产生的光谱边带效应测量单模光纤色散系数。

2 测量原理

有别于真正孤子脉冲在腔内的自由传输,类孤子脉冲在光纤激光器腔内经历周期性损耗和增益的微扰^[13]。如果微扰的距离与脉冲的特征长度是同一个数量级,类孤子脉冲就会在每次微扰以后向外发散出部分能量,然后向着真正的孤子脉冲演变,而发散出来的那部分能量就是所谓的色散波。在光纤激光器中,色散波在腔内不断地运转,会与孤子波产生显著的干涉效应,导致边带的产生。这些边带表现出孤子光谱在相应边带波长上能量的损耗比例,因此制约了极限短脉冲的获得^[14]。而各级边带相对于中心波长 λ_0 的偏移量 $\Delta\lambda_N$ 由下面关系式给出^[15]:

$$\Delta\lambda_N = \text{sgn}(N)\lambda_0 \left[\frac{2|N|}{cD_L} - 0.0787 \left(\frac{\lambda_0}{c\tau} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 N 为边带级数, τ 为输出脉冲的脉冲宽度, D_L 为腔内的总色散, c 为真空中的光速。(1) 式反映了各级边带偏移量 $\Delta\lambda_N$ 、腔内总色散与输出脉冲参量(脉宽、中心波长)三者之间的联系。从(1)式可见,边带相对于中心波长偏移量的平方与符号函数的积 $\text{sgn}(N)(\Delta\lambda_N)^2$ 和边带级数 N 的斜率,受腔内总色散的约束。根据(1)式,通过实验测量输出脉冲的脉冲宽度、中心波长和脉冲光谱各级边带相对于脉冲中心波长的偏移量,就可以得到激光器腔内总色散。在此基础上,在腔内增加待测光纤,按上述过程再次测量腔内总色散,两者相比较就可以得到待测光纤的色散值。

3 测量装置

目前光纤激光器的结构主要有环形腔和“8”字型腔两种,输出波长覆盖 C-波段和 L-波段^[16],在测

量装置的具体实施方案上,选择了目前光纤激光器中技术较为成熟的环形腔结构作为本实验的测量装置,具体结构如图 1 所示。

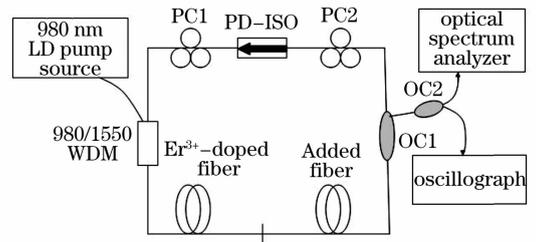


图 1 环形腔光纤激光器测量光纤色散装置图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber ring laser for fiber dispersion measurement

在采用的环形腔结构中,全部元件均为全光纤器件,以保证光在全光纤环境下连续运转而不受外界环境的影响。其中,976 nm 半导体激光器(LD)在经过波分复用(WDM)后的最大输出功率为 250 mW。特别订制的偏振相关光纤隔离器(PD-ISO),保证了腔内激光的单方向运转。实验中表明,订做的偏振相关光纤隔离器比偏振无关光纤隔离器与偏振器的组合更容易产生谱线宽度更大的脉冲,而且产生的光谱边带更加明显。利用光纤弹光效应的全光纤在线偏振控制器(PC),用于改变光纤的双折射,从而改变光纤内传输光的偏振态;输出耦合器的耦合比为 1:99。选择 1% 耦合输出,目的是减低锁模激光器的阈值功率。在输出端分别采用 Anritsu MS9710C 光谱分析仪、Tektronix 示波器对输出脉冲的光谱和脉冲状态进行直接测量和观察。环形腔的腔长约为 17 m,包括 4.5 m 长的 Er^{3+} 光纤 [$D \approx -15 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$] 和 12.5 m 长的常规单模光纤(SMF) [$D = 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$],腔内总色散约为 145 fs/nm。

环形腔光纤激光器利用非线性偏振旋转的锁模原理为^[17]:在脉冲形成的初始阶段,由噪声引起幅度较小的光脉冲,光脉冲经过与偏振敏感的光隔离器后成为线偏振光,再经过第一个偏振控制器 PC1 变成椭圆偏振光,该椭圆偏振光可看作两个互相垂直、具有不同强度的线偏振光的合成,当这两个偏振方向不同的线偏振光经过掺 Er^{3+} 光纤得到增益放大时,会经历腔内克尔(Kerr)效应,引起自相位调制,得到与光强有关的非线性旋转(即非线性相移),会引起脉冲峰值较脉冲两沿经历更多的非线性相移。通过调节 PC 2 的位置,使得光脉冲峰值偏振方向与偏振相关光纤隔离器的偏振方向一致,从而使光脉

冲峰值部分经历最小的损耗而通过，而光脉冲的前后两翼则被抑制，光脉冲发生窄化，最后实现稳定锁模脉冲，其作用相当于可饱和吸收体。

4 测量结果

首先在不加被测光纤的情况下，对腔内总色散进行了测量。通过调整两个偏振控制器的方位角，很容易获得锁模脉冲。图 2 是光纤激光器锁模脉冲的光谱图，可见输出脉冲稳定，光谱边带明显。实验中发现，有时候连续光和色散波干涉叠加也会产生边带效应。为了确定谱线宽度为 6.96 nm 时是否形成了锁模脉冲激光，使用了 PIN 光电探测器及 Tektronix 示波器来同步监测输出光的时域脉冲特性。图 3 给出了示波器上观察到的锁模脉冲序列，整齐而稳定的脉冲序列表明此时形成了很好的锁模脉冲，由示波器测得的光脉冲重复频率为 12.23 MHz。

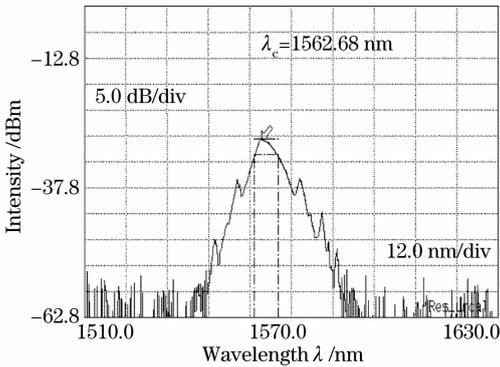


图 2 3 dB 谱线半峰全宽为 6.96 nm 时的输出边带光谱
Fig. 2 Output sideband spectrum of the laser with spectral width of 6.96 nm at full width half maximum (FWHM)

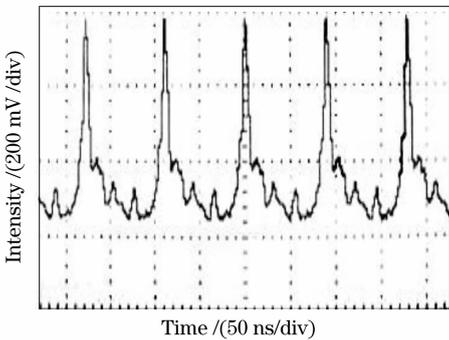


图 3 锁模脉冲序列
Fig. 3 Mode-locked pulse trains

通过测量各级边带与中心波长的偏移量，得到光纤环形腔内的总色散，计算结果如表 1 所示， $\lambda_0 = 1562.68 \text{ nm}$, $\tau = 452 \text{ fs}$ 。对表 1 数据取平均值得到腔内总色散为 132 fs/nm。图 4 清楚地表明，光谱

边带级数 N 为正整数和负整数时，两边的直线斜率相同，而在 $N=0$ 时，曲线存在拐点。拐点的起因是由于(1)式中符号函数引起的总函数符号跃变的结果。由于拐点两边直线的斜率是相等的，因此对色散值测量没有影响。

表 1 腔内总色散计算结果

Table 1 Calculated results of total cavity dispersion

Sideband order	Sideband wavelength /nm	Total dispersion / (fs/nm)
-2	1547.68	130.00
-1	1553.06	137.96
1	1572.40	135.74
2	1577.88	126.94
3	1582.20	132.55

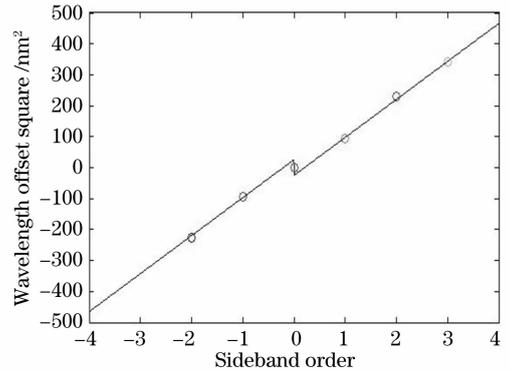


图 4 各级边带偏移量的平方符合曲线
Fig. 4 Square of wavelength offset of different sideband orders fits a total dispersion

在测定了环形腔内总色散后，分别在腔内增加了 2 m、4 m 和 6 m 的 G. 652 常规单模光纤，按照上述的实验方法分别测量了腔内总色散，增加不同长度常规单模光纤后腔内总色散的变化如图 5 所示，其一次拟合直线的斜率就是待测常规单模光纤

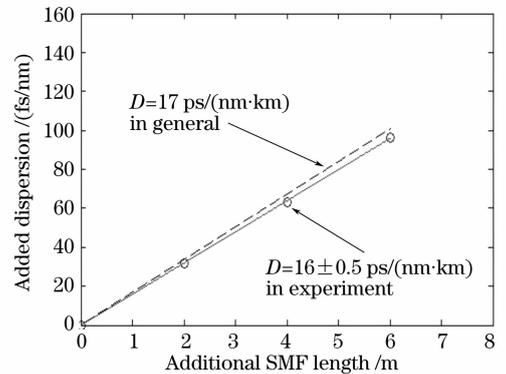


图 5 不同长度的单模光纤在 1560 nm 波段对应的腔内总色散
Fig. 5 Total cavity dispersion at 1560 nm with different SMF lengths

的色散系数,其值约为 $16 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,与 G. 652 在 C 波段的典型值 $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 符合的很好,误差在 5% 左右。

实验误差产生的一个重要原因可能来自光纤非线性效应。本实验采用的测量方法是基于光纤色散与自相位调制非线性效应相互作用产生孤子脉冲的原理,测量的色散值包括腔内线性色散和非线性色散的总和。而一般的光纤色散测量只包括材料色散和波导色散,并不包括非线性效应所产生的色散贡献。

5 结 论

提出一种利用掺铒光纤激光器产生的光谱边带效应测量单模光纤色散系数的方法。实验结果表明,在 1560 nm 波段测量的常规单模光纤的色散系数为 $16 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,与典型值 $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 符合得很好。该方法可以对 5 m 内的短光纤进行色散测量,因此可以应用于测量价格昂贵的特种光纤(掺铒光纤、磷酸盐玻璃光纤、光子晶体光纤等)的色散值。随着工作在 L 波段的波长可调谐的环形腔掺铒光纤激光器的不断发展,此测量方法可以从 C 波段延伸到 L 波段,覆盖目前主流的宽带通信波段,对通信系统色散补偿前的色散测量有很大的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Chen Weicheng, Xu Wencheng, Luo Aiping *et al.*. Ultra-short pulse compression in dispersion-managed fibers [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(2): 218~220
陈伟成, 徐文成, 罗爱平等. 色散管理光纤中超短光脉冲压缩效应研究[J]. *电子学报*, 2002, **30**(2): 218~220
- 2 Zhou Bing, Jiang Yongliang, Chen Xiaowei *et al.*. Numerical simulation on propagation of ultra-short laser pulse in photonic crystal fibers with different group velocity dispersion parameter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 323~328
周冰, 姜永亮, 陈晓伟等. 超短激光脉冲在不同色散参量光子晶体光纤中传输的数值模拟[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 323~328
- 3 L. G. Cohen, C. Lin. Pulse delay measurements in the zero material dispersion wavelength region for optical fibers [J].

- Appl. Opt.*, 1977, **16**(12): 3136~3139
- 4 C. K. Madsen. Chromatic and polarization mode dispersion measurement technique using phase-sensitive sideband detection [C]. *OFC*, 2001. M06
 - 5 T. Dennis, P. A. Williams. Achieving high absolute accuracy for group-delay measurements using the modulation phase-shift technique[J]. *Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3748~3754
 - 6 Valeria Gusmeroli. Attosecond measurement of fiber-optic chromatic dispersion by white-light interferometry [C]. *OFC*, 1995. 180~181
 - 7 K. S. Abedin, M. Hyodo, N. Onodera. Measurement of the chromatic dispersion of an optical fiber by use of a Sagnac interferometer employing asymmetric modulation [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(5): 299~301
 - 8 G. K. L. Wong, A. Y. H. Chen, S. W. Ha *et al.*. Characterization of chromatic dispersion in photonic crystal fibers using scalar modulation instability[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(21): 8662~8670
 - 9 Erik J. Bochove, Ester M. de Carvalho. Conversion of a wideband frequency-modulated signal to amplitude modulation through dispersion in an optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(3): 139~141
 - 10 M. Tomizawa, Y. Yamabayashi. Effect of modulation instability on phase modulation-amplitude modulation conversion in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10): 1128~1130
 - 11 J. S. Pereira, J. B. Rosolem, R. Arradi *et al.*. Measurement of zero-dispersion wavelength using a novel method based on cw four-wave mixing [C]. *OFC*, 1998. 345~346
 - 12 Shuxian Song, Christopher T. Allen, Kenneth R. Demarest. A novel method for measuring polarization-mode dispersion using four-wave mixing [J]. *Lightwave Technol.*, 1999, **17**(12): 2530~2533
 - 13 S. M. J. Keliy, K. Smith, K. J. Blow *et al.*. Average soliton dynamics of a high-gain erbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(17): 1337~1339
 - 14 J. P. Gordon. Dispersive perturbations of solitons of the nonlinear Schrödinger equation [J]. *Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(1): 91~97
 - 15 D. U. Noske, N. Pandit, J. R. Taylor. Source of spectral and temporal instability in soliton fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(21): 1515~1517
 - 16 Yang Shiquan, Zhao Chunliu, Meng Hongyun *et al.*. Wavelength tunable erbium-doped fiber ring laser operating in L-band [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **29**(8): 677~679
杨石泉, 赵春柳, 蒙红云等. 工作在 L-波段的可调谐环形腔掺铒光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2002, **29**(8): 677~679
 - 17 Song Fang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. 78 fs passively mode-locked Er^{3+} -doped fiber ring laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1174~1177
宋方, 徐文成, 陈伟成等. 78 fs 被动锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1174~1177