

文章编号: 0253-2239(2010)01-0132-05

环形腔光纤激光器中光谱边带不对称性特性研究

高玉欣 徐文成 罗智超 罗爱平 宋创兴

(华南师范大学光电子信息科技学院, 光子信息技术广东省重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 理论分析了环形腔锁模光纤激光器中光谱边带不对称性产生的物理机制, 实验中搭建了环形腔被动锁模光纤激光器平台, 通过调节偏振控制器, 在 L 波段获得了明显不对称的边带光谱。实验结果表明, 光谱不对称性主要存在两方面的明显特点: 1) 强度不对称性, 最明显时正二级的强度比负二级的强度高 14.28 dBm; 2) 数量不对称性, 最明显时正级数量要比负级数量多 5 个。通过对光谱边带不对称性物理机制的分析对如何消除边带效应以获得理想的孤子脉冲具有重要的指导意义。

关键词 激光器; 边带不对称性; 光纤激光器; 被动锁模; 环形腔

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0132

Characteristics of the Sideband Asymmetry in a Fiber Ring Laser

Gao Yuxin Xu Wencheng Luo Zhichao Luo Aiping Song Chuangxing

(Laboratory of Photonic Information Technology, School of Information of Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract Physical mechanism of the sideband asymmetry is theoretically analyzed in the fiber ring lasers. A passive mode-locked erbium-doped fiber ring laser is constructed in the experiment. The obvious asymmetry of the spectral sidebands in an L-band is obtained by adjusting polarization controllers. The asymmetry of sidebands can be observed in two aspects: on the one hand, the asymmetry of the power between the positive and the negative order numbers is obvious, which can be observed that the intensity of the positive second order is higher 14.28 dBm than that of the negative same order; on the other hand, the sideband asymmetry numbers from the positive to the negative orders are also obvious, the number of the positive orders is more 5 numbers than that of the negative. The sideband asymmetry is useful for the research of eliminating the sidebands and acquiring the ideal soliton pulses and so on.

Key words lasers; sideband asymmetry; fiber laser; passively mode-locking; ring cavity

1 引 言

自从 1550 nm 光通信窗口打开以来, 光纤通信向着远距离、高容量的方向发展, 该发展趋势对激光光谱的平滑程度以及脉冲前后沿的非重叠性无疑提出了更高的要求。而在超短脉冲掺铒光纤激光器实验中, 产生的光谱总伴随着边带。光谱边带一方面使光谱的主脉冲能量减少, 另一方面使激光器输出脉冲的频谱质量发生劣化, 容易使信号之间产生串扰, 从而直接影响激光器在长距离光纤通信系统的

应用。因此, 如何获得无光谱边带的超短脉冲是近年来非线性光纤光学研究领域中的一个重要的研究课题^[1-6]。

对光谱边带的研究国内并不多。国外从 20 世纪 80 年代开始就有人提出了光谱边带的问题, 但是在整个 80 年代, 对于边带的产生原因、不对称性机理、如何消除边带等仍处于探索研究阶段。1982 年 R. H. Stolen 等^[7]对双折射光纤中光脉冲以不同的角度入射时对脉冲整形效应做了初步的研究, 为以

收稿日期: 2009-01-19; 收到修改稿日期: 2009-04-10

基金项目: 广东省自然科学基金(04010397)资助课题。

作者简介: 高玉欣(1981—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器和高码率光通信等方面研究。

E-mail: liayuan322@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的应用等方面的研究。E-mail: xuwch@scnu.edu.cn(通信联系人)

后的边带不对称性研究奠定了理论基础。1991 年 N. Pandit 等^[8]将边带不对称性的起因归结于拉曼散射效应,较长波长低频率范围内的边带产生是由于较短波长高频率的孤子放大作用引起的。1994 年 D. U. Noske 等^[1~3]提出了调制不稳定性会产生光谱边带的不对称性。W. S. Man 等^[6,9,10]将光谱边带不对称性解释为环形腔内双折射效应产生不同的光谱滤波效果所致。2007 年叶辉等^[11]利用飞秒脉冲光谱边带效应测量了光纤色散,获得了满意的结果。在文献[11]的基础上进一步研究环形腔光纤激光器中激光光谱边带不对称性特性,分析光谱边带产生的物理机制以及如何消除边带成分以获得理想的孤子脉冲。

2 理论分析

边带的形成是由于光在激光腔中运转经过光纤耦合器输出的损耗与在掺铒光纤中的增益放大导致激光腔中脉冲能量与峰值功率的周期性扰动,形成孤子并泄露出色散波,而该孤子和泄露出的色散波达到干涉相长的条件时,即在该处形成边带,表示为

$$|\beta(\omega_0) + \beta_1 \delta\omega + k_s - \beta(\omega_0 + \delta\omega)|L = 2\pi m, \quad (1)$$

式中 m 为整数, $\beta(\omega_0 + \delta\omega)$ 是色散波的传播常数, k_s 是孤子波数。即只要(1)式中满足 m 是整数时,左右等式成立,一个级数的边带即可产生。

本实验中,为了更好的分析边带不对称性物理机制,将整个环形腔等效为如下模型^[7,12,13]。由于色散波强度小,非线性效应较弱,对边带不对称性的分析仅考虑激光腔中的线性传输特性^[7]。由图 1 所示的模型,整个系统的透射比表示^[9,14~16]为

$$|T|^2 = \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cos \Delta\varphi_l, \quad (2)$$

式中 T 为系统的透射比, θ_1 为光经过偏振相关隔离器后快轴 y 与起偏器投射方向 v 之间的夹角, θ_2 是偏振器方向 v 与快轴 y 之间的夹角, $\Delta\varphi_l$ 为该系统产生的线性相移,具体表达式为

$$\Delta\varphi_l = \frac{2\pi L}{\lambda_s} (n_x - n_y), \quad (3)$$

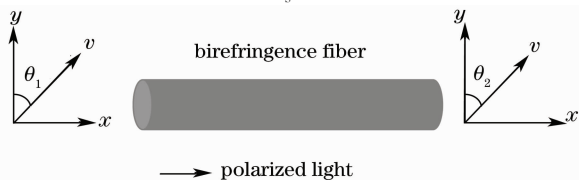


图 1 环形腔中激光器等效装置图

Fig. 1 Equivalent setup to the fiber ring laser

式中 n_x, n_y 为腔内沿两个主轴的平均折射率, λ_s 为信号光波长。

由(2)式可知,改变 θ_1 和 θ_2 时,其透射比亦会相应改变。如图 2 中曲线所示, $\theta_1 = \pi/4, \theta_2 = \pi/4$ 时,主波透射比 T 达到最大值 1;当保持 θ_2 值不变,改变 θ_1 (如图 2 中虚曲线所示),色散波的光谱透射比相对于主波透射比有很大的漂移。也就是说,改变 θ_1 ,色散波的光谱透射比会相对于主波透射比向长波方向漂移,色散波和主波发生干涉相长的几率在长波长范围内多一些,从而使得长波范围内的正级数边带数量要比短波范围内负级数边带数量多一些,长波范围内的正级数边带强度也比短波范围内的同等级数的负级数边带强度强一些(如图 2 所示)。此外,由图 2 还可以看出,实验中只要调节偏振控制器 PC₁ (调节 θ_1) 至不同的角度,相应的会导致透射比达到极大值并且其中心波长位置发生改变,同时透射比的极大值的大小也相应地发生改变,从而改变不同波长的吸收滤波效果,最后造成激光光谱中心波长两边出现不对称的光谱边带。

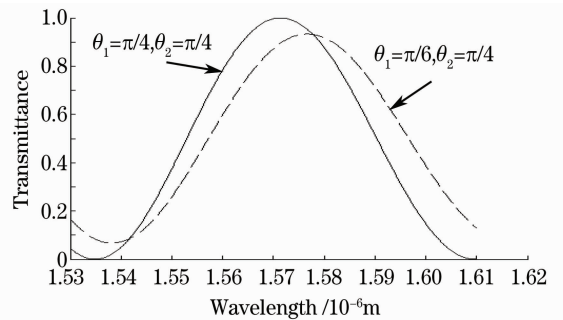


图 2 色散波的光谱透射比(虚线)和主波透射比(实线)相对于波长的变化情况

Fig. 2 System transmittance versus the different wavelength between the dispersive wave (the dashed line) and the major wave (the solid line)

3 实验结果及分析

图 3 所示为环形腔掺 Er^{3+} 光纤激光器实验装置图。半导体二极管(LD)激光器(中心波长为 980 nm)为抽运源。OC1 和 OC2 为输出耦合器,耦合比为 90:10,其中 10% 为输出端。PD-ISO 为特别定制的偏振相关隔离器,它有两方面的作用:1)偏振相关的隔离器将随机偏振入射的光波转变为线偏振光;2)和双折射光纤组合实现了被动锁模的光强敏感类饱和吸收体的作用。PC1 和 PC2 为偏振片,是为了改变光的偏振态。

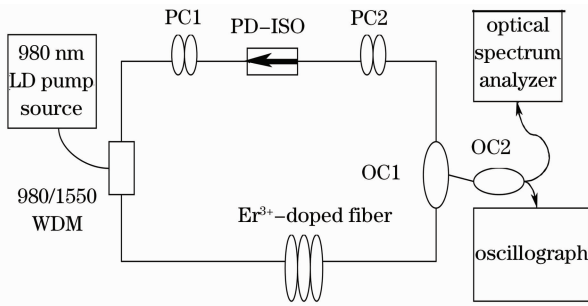


图 3 环形腔光纤激光器实验装置图

Fig. 3 Schematic diagram of the doped fiber ring laser

环形腔光纤激光器工作原理如下:从 PC1 出来的光经过其作用变为椭圆偏振光,进入掺 Er^{3+} 光纤得到增益放大,后进入 PC2,在此过程中,由于克尔效应,使得椭圆偏振光的两个相互垂直的偏振分量经历相同长度的光纤所产生的非线性相移不同,进而使椭圆偏振光的偏振态发生了改变。当光经过 PC2 时,将调整光脉冲的偏振方向与后面的偏振相关隔离器 PD-ISO 的偏振方向一致,这样的结构使得光脉冲的峰值经历最小的损耗而通过,而光脉冲的两翼经历了较大的损耗而削减掉,从而使光脉冲发生窄化(类似于快饱和和吸收体),最终达到锁模状态。

当抽运功率约为 40 mW 时,仔细调节偏振控制器,激光器实现了锁模脉冲输出,锁模光谱上附有边带的出现,如下图 4 所示光谱和图 5 所示的脉冲序列。

由图 5 观察到的稳定的脉冲序列,说明图 4 的光谱已经达到锁模状态。从图 4 中观察到,正负级数边带光谱此时还是基本对称的,对各级数边带进行测量会发现,正负同等级数强度存在约 1.73 dBm 的差值,上述微弱的不对称性是由于调节偏振控制器 PC 的精度所引起的。保持腔内其它参数不变,继续增加抽运功率至 120 mW 时,发现抽运功率除了使脉冲序列的强度有轻微的增加外(但此时脉冲

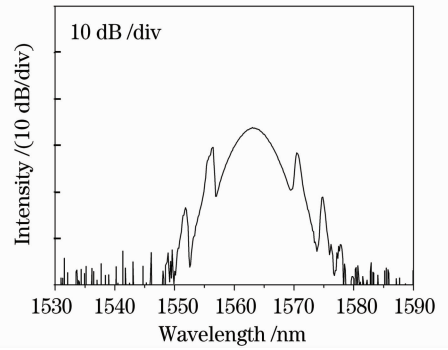


图 4 在正负级数和强度上相对比较对称的边带光谱

Fig. 4 Relative symmetry of the sidebands in the power and orders

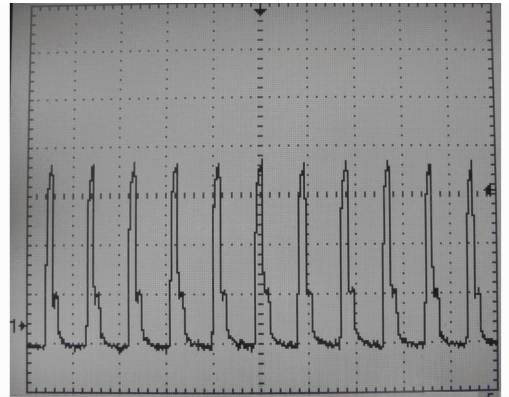


图 5 锁模脉冲序列

Fig. 5 Mode-locking pulse train

序列长时间处于稳定状态)对光谱边带不对称性无明显影响。保持 120 mW 抽运功率不变,调节偏振控制器,正负级数上的不对称性会越来越明显,最明显时正级数由 2 个变到 5 个,甚至 7 个,并且在此过程中,边带强度也相应的表现出了明显的不对称性,而脉冲序列一直处于稳定状态,证明该时仍然处于锁模状态,并最终获得了在 L 波段具有明显的光谱边带不对称性的锁模光谱,如图 6(a)和(b)所示。

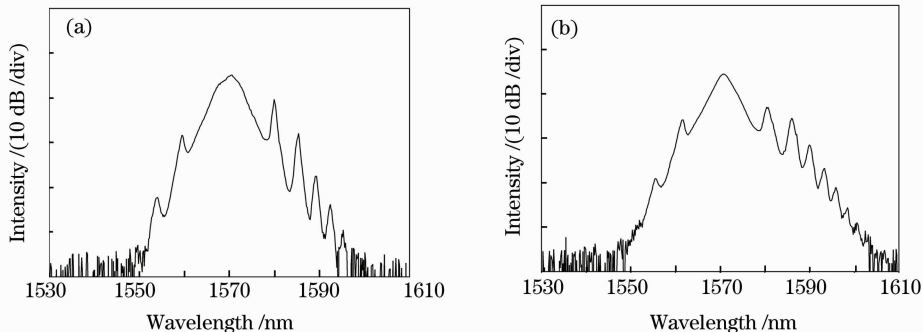


图 6 光谱边带图。(a)边带光谱在正负强度和级数上的不对称性;(b)边带光谱更明显的在左右级数上不对称性

Fig. 6 Spectrum of the sidebands. (a)asymmetry of the sidebands in the power and orders;(b)asymmetry of the sidebands in the orders between the positive and the negative

对图 6 (a), (b) 中的各级边带偏离中心波长的程度以及强度进行测量, 具体数值如表 1, 表 2 所示。

表 1 图 6(a) 中边带参数的测量分析

Table 1 Analysis of parameters of the sidebands corresponding to the fig. 6 (a)

Order number	$\Delta\lambda$ / nm	Power / dBm
-2	-15.92	-42.24
-1	-10.48	-28.33
0	0	-14.89
+1	10.00	-20.36
+2	15.44	-27.96
+3	19.28	-37.47
+4	22.48	-43.79
+5	25.36	-49.55

表 2 图 6(b) 中边带参数的测量分析

Table 2 Analysis of parameters of the sidebands corresponding to the fig. 6 (b)

Order number	$\Delta\lambda$ / nm	Power / dBm
-2	-15.36	-39.05
-1	-9.12	-25.79
0	0	-15.49
+1	9.60	-22.95
+2	15.20	-25.44
+3	19.20	-31.44
+4	22.56	-36.72
+5	25.12	-41.02
+6	27.68	-45.48
+7	29.76	-48.98

从表 1, 表 2 可以看出, 通过调节偏振控制器, 边带在正负级数的数量方面、左右同等级数的强度等方面都表现出了明显的不对称性。在正负同等级数数量方面最明显时[如图 6(b)]正负级数最多达到 5 个级数的差值(负值有 2 个级数的边带, 而正值有 7 个级数的边带)。在左右同等级数上, 强度表现出了很明显的不对称性[如图 6(a)], 负级数的二级强度最明显时比正级数的二级强度低 14.28 dBm (负级数的二级强度为 -42.24 dBm, 而正级数的二级强度只有 -27.96 dBm)。造成这明显的不对称性可以利用上述的关于理论分析边带的产生原因和边带不对称性的理论分析以及本实验中偏振控制器的作用解释比较合理。

综上所述, 在同等级数的强度方面, 正级数的边带强度高于负级数的边带强度, 在左右数量方面, 正级数数量多于负级数数量。由于 θ_1 和 θ_2 值的不同, PC1 会对不同波长的光的吸收过滤效果的不同, 从而导致其对不同波长范围内的色散波的吸收效果是

不同的, 即在该实验过程中调节偏振控制器 PC1 时, 偏振控制器对不同波长范围内的吸收过滤效果的不同使得主波透射比和色散波的光谱透射比发生一定程度的漂移, 再由(1)式可得, 它们在短波范围内发生干涉相长的机会就少一些。因此, 正值级数色散波和孤子波发生干涉形成边带的几率就比负级级数要多得多了, 故出现了左右级数严重不对称的情况, 从而导致了上面的边带正级数数量多于负级数数量, 同等级数上正级数强度高于负级数强度的现象。通过实验现象会发现, 实验结果符合上述理论分析。在有关环形腔被动锁模光纤激光器实验中, 本实验现象表现的很明显。

4 结 论

报道了在环形腔中利用非线性偏振旋转技术, 通过调节偏振控制器, 最终得到了极为明显的光谱边带不对称的锁模脉冲的输出。实验获得的光谱边带不仅在左右同等级数上的强度有着很明显的不对称性, 更为明显的是其在左右级数的数量上有着很明显的不对称性, 而且是在环形腔被动锁模光纤激光器中发现正值级数远远少于负级级数的情况。以上关于边带不对称性的研究, 对如何消除边带效应以获得理想的孤子脉冲具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 D. U. Noske, N. Pandit, J. R. Taylor. Source of spectral and temporal instability in soliton fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(12): 1515~1517
- 2 S. M. J. Kelly. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(8): 806~807
- 3 M. L. Dennis, I. N. Duling III. Experimental study of sideband generation in femtosecond fiber lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(6): 1469~1477
- 4 L. W. Liou, M. Yu, T. Yoshino, G. P. Agrawal. Mutual injection locking of a fiber laser and a DFB semiconductor laser[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1): 41~42
- 5 D. J. Jones, Y. Chen, H. A. Haus *et al.*. Resonant sideband generation in stretched pulse fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(9): 1535~1537
- 6 D. Y. Tang, J. Wu, L. M. Zhao *et al.*. Dynamic sideband generation in soliton fiber lasers[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **275**(1): 213~216
- 7 R. H. Stolen, J. Botineau, A. Ashkin. Intensity discrimination of optical pulses with birefringent fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(10): 512~514
- 8 N. Pandit, D. U. Noske, S. M. Kelly *et al.*. Characteristic instability of fiber loop soliton lasers[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(5): 455~457
- 9 W. S. Man, H. Y. Tam, M. S. Demokan *et al.*. Mechanism of intrinsic wavelength tuning and sideband asymmetry in a passively mode-locked soliton fiber ring laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(1): 28~33

- 10 D. Y. Tang, S. Fleming, W. S. Man *et al.*. Subsideband generation and modulational instability lasing in a fiber soliton laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(10): 1443~1450
- 11 Ye Hui, Xu Wencheng, Luo Zhichao *et al.*. Measurement of dispersion of an optical fiber in ring cavity using the sideband spectrum method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1323~1326
叶 辉, 徐文成, 罗智超 等. 利用光纤激光器边带效应测量光谱色散[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1323~1326
- 12 C. J. Chen, P. K. A. Wai, C. R. Menyuk. Soliton fiber ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6): 417~419
- 13 Z. C. Luo, W. C. Xu, C. X. Song *et al.*. Pulse-train nonuniformity in an all-fiber ring laser passively mode-locked by nonlinear polarization rotation[J]. *Chin. Phys. B*, 2009, **18**(6): 2328~2333
- 14 Xinhuan Feng, Hwa-yaw Tam, P. K. A. Wai. Stable and uniform multiwavelength erbium doped fiber laser using nonlinear polarization rotation [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18): 8205~8210
- 15 Shen Minchang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. Experimental study of fiber ring laser with single polarization controller [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2003~2007
申民常, 徐文成, 陈伟成 等. 单偏振控制器环形腔光纤激光器实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2003~2007
- 16 Song Chuangxing, Xu Wencheng, Luo Zhichao *et al.*. Tunable mode-locked pulse erbium-doped fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1292~1295
宋创兴, 徐文成, 罗智超 等. 可调谐锁模脉冲环形腔掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1292~1295