

文章编号: 0253-2239(2009)04-0991-05

被动锁模光纤激光器光谱边带

赵 羽¹ 刘永智¹ 赵德双² 黄 琳¹ 代志勇¹

(¹ 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; ² 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要 基于非线性偏振旋转锁模原理、非线性薛定谔方程和色散波干涉理论,建立了被动锁模光纤激光器的光谱分析模型。采用此模型进行数值仿真,研究了腔体长度、增益光纤长度和耦合输出比对光谱边带的影响。并分别采用 13 m、16 m 和 26 m 的腔长,0.5 m、1.5 m 和 3 m 的掺铒光纤以及不同的耦合输出比进行了实验,对比了上述情况下激光器的输出光谱。实验与仿真结果表明,要抑制光谱边带,应尽量缩短腔长,适当增加增益光纤的长度和采用较低的耦合输出比,并保证激光器处在基阶锁模状态。理论模型的仿真结果与实验现象吻合较好。取 3 m 增益光纤、13 m 腔长和 10% 的输出比,获得了光谱边带抑制较好、谱宽 20.4 nm 的锁模脉冲激光,重复频率为 15.87 MHz,单脉冲能量约 0.52 nJ,脉冲幅度和光谱谱宽分别存在约 4% 和 2% 的波动。

关键词 光纤激光器; 光谱边带; 增益光纤长度; 腔体长度; 耦合输出比

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0991

Study on Side Bands in Passively Mode-Locked Fiber Laser

Zhao Yu¹ Liu Yongzhi¹ Zhao Deshuang² Huang Lin¹ Dai Zhiyong¹

¹ School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China
² School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract A model was established to analyze the side bands suppression methods of mode-locked fiber laser. The model was based on nonlinear Schrödinger (NLS) equation, nonlinear polarization rotation mode-locking principle and dispersion wave interference theory. The affects of cavity length, gain fiber length and coupling output ratio on the side bands were analyzed. Mode-locked fiber laser with 0.5 m, 1.5 m and 3 m Er³⁺-doped fiber (EDF), 13 m, 16 m and 26 m ring length and different output ratios was experimentally studied. Theoretical simulation and experiments show that the EDF length should be appropriately increased to restrain side bands, the ring length should be decreased, the output coupling ratio should be small and the fiber laser should be mode-locked on the fundamental order. The fiber laser with 3 m EDF, 10% ratio and 13 m ring length was experimentally carried out. The output pulse with restrained side bands and spectrum width of 20.4 nm is detected. The repetition rate is 15.87 MHz, and the single pulse energy is 0.52 nJ. The fluctuations of pulse amplitude and spectrum width are 4% and 2%.

Key words fiber laser; side bands; gain fiber length; cavity length; output coupling ratio

1 引 言

被动锁模光纤激光器结构简单、可以直接产生变换极限的超短光脉冲,在未来超高速、长距离光纤通信、超快现象、光纤传感、频标测量等方面有着十分广阔的应用前景,近 10 年取得了快速的发

展^[1~4]。然而,被动锁模光纤激光器的稳定性一直没有得到很好的解决,在很大程度上限制了其广泛应用^[4~10]。特别是激光器输出脉冲中普遍存在大量的光谱边带。不仅会限制脉冲的宽度和能量,而且会引起相邻孤子脉冲间的相互作用,造成脉冲定

收稿日期: 2008-06-06; **收到修改稿日期**: 2008-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(60736038),国家 863 计划基金(2007AA01Z269)和国防预研(9140A020A0106DZ0222)资助课题。

作者简介: 赵 羽(1981—),男,博士研究生,主要从事脉冲光纤激光器及其应用的研究。E-mail: yuzhao@uestc.edu.cn

导师简介: 刘永智(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感与信息处理研究。E-mail: yzliu_123@uestc.edu.cn

时抖动,加剧长距离通信的误码率^[5~10],这对它的实际应用造成了很大的障碍。目前,为加快被动锁模光纤激光器在实际工程中的应用进程,不断地提高其工作稳定性已经十分必要。为此,本文就腔体长度、增益光纤长度、耦合输出比和锁模状态对光谱边带的影响作了理论和实验分析,得出了抑制光谱边带获得稳定脉冲的方法。

2 实验装置与原理分析

2.1 实验装置

被动锁模环形腔掺 Er^{3+} 光纤激光器(EDF)实验装置如图 1 所示。其腔体主要由高掺杂浓度 EDF、光纤起偏器(Polarizer)、光纤隔离器(ISO)、2 个光纤偏振控制器 PC1 和 PC2、980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)和输出耦合器(Output coupler)组成。掺铒光纤为高浓度掺杂光纤,对 980 nm 光的吸收为 15 dB/m;抽运源为高稳定带尾纤的半导体二极管,中心输出波长为 980 nm,最大输出功率约为 120 mW,输出功率波动小于 0.5 mW。为保护探测器,锁模脉冲输出后经 17 dB 的衰减,再由 50:50 耦合器分成两束用光谱仪和示波器观测。

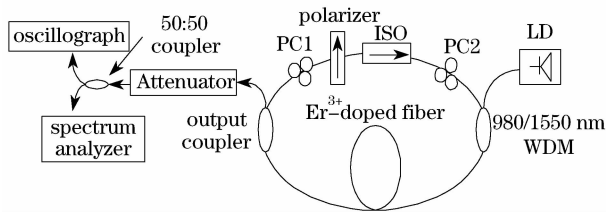


图 1 环形腔被动锁模激光器实验装置图

Fig. 1 Structure of passively mode-locked fiber ring laser

信号光经过起偏器和 PC1 转换成椭圆偏振光,此光在腔体中传播时,由于光纤的自相位调制(SPM)和群速度色散(GVD)等作用而累积与光强相关的非线性相移,从而引发出一个偏振相关的自幅度调制可饱和吸收体效应,进而实现锁模脉冲的窄化,形成超短脉冲输出。

2.2 光谱边带产生原理及理论分析

Kelly 等^[5~7]的详细研究发现,光谱边带真正的起因来源于谐振腔内的色散波与孤子脉冲之间的相长干涉。孤子脉冲在腔内循环时,部分能量由耦合器输出,造成脉冲能量的损失,然后经历可饱和吸收体和增益光纤的作用得以恢复。为适应这种周期性的扰动,孤子脉冲只能将一部分能量转化为色散波辐射出去。当色散波与孤子脉冲间的相位差在一次循环中满足相干增强条件时,就会形成光谱边带。

因此可将环形腔体分为四个部分:非线性偏振旋转可饱和吸收体、增益光纤、普通光纤和耦合输出器。其中前两个部分的作用可形成孤子脉冲,而后两个部分带来能量损耗并产生色散波,四个部分的综合作用就会引起上述相长干涉。非线性偏振旋转可饱和吸收体对锁模光脉冲的调制通常等效为^[11]

$$M = -\alpha_s + \gamma_3/\gamma |U|^2 - \gamma_5/(\gamma^2 L_d) |U|^4, \quad (1)$$

式中 U 为归一化脉冲包络, α_s 为可饱和吸收体所引入的线性损耗, γ_3 表示等效可饱和吸收体的三阶非线性增益系数, γ_5 为可饱和吸收体的五阶非线性调制系数; γ 为光纤非线性 Kerr 系数, $L_d = t_0^2/|\beta_2|$ 为色散长度, β_2 为光纤群速度色散(GVD)系数, t_0 为腔内脉冲的时间宽度。

在增益光纤中,脉冲满足如下归一化非线性薛定谔(NLS)方程^[11,12]:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \text{sgn} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + |U|^2 U = \left[\frac{i}{2} g L_d \left(1 + \frac{t_2}{t_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} \right) \right] U, \quad (2)$$

其中 ξ 和 τ 分别为归一化空间距离和时间。 t_2 为极化弛豫时间,它与光脉冲远离增益峰谱分量的增益减小有关; $g(z, t) = g_0/(1 + P_{av}/P_{sat})$ 为归一化增益系数,其中 g_0 为小信号增益, $P_{av} = P_0/T \int_{-T/2}^{T/2} |U|^2 dt$ 为脉冲平均光功率, P_{sat} 为增益介质的饱和功率。

在普通光纤中,脉冲的传输满足的 NLS 方程为^[12]

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \text{sgn} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \frac{L_d}{L_n} |U|^2 U = 0, \quad (3)$$

其中 $L_n = 1/(P_0 \gamma)$ 为非线性长度, P_0 为脉冲峰值功率。

耦合输出器对腔内造成的损耗由下式决定:

$$U = U(1 - R)^{1/2}, \quad (4)$$

其中 R 为耦合输出比。在这四部分的综合作用下,光脉冲与色散波产生相长干涉,多次循环后达到动态平衡,就会形成输出光谱中突起的光谱边带。

3 数值仿真与实验结果对比分析

基于(1)式~(4)式,结合分步傅里叶变换法(Split step Fourier transformation, SSFT)对输出光谱进行了数值仿真。增益带宽 30 nm,小信号增益为 7.5 dB,归一化增益介质的饱和功率为 0.33;普通光纤和增益光纤的色散系数分别为 $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$ 和 $15.5 \text{ ps}^2/\text{km}$,光纤的非线性 Kerr

系数、可饱和吸收体的三阶非线性增益系数、五阶非线性调制系数和线性损耗分别 $2.6 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 、 $0.39 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 、 $0.12 \text{ W}^{-2} \text{ km}^{-1}$ 和 0.08 dB km^{-1} ；脉冲基本宽度为 500 fs ，极化弛豫时间取 100 fs ，峰值功率取归一化强度。

3.1 腔体长度对光谱边带的影响

图 2(a)为不同的腔体长度(L)下的锁模脉冲光谱的仿真结果,仿真中 L 分别取 26 m 、 16 m 和 13 m ,增益光纤长度取 3 m ,耦合输出比取 10% 。图 2(b)为依图 1 搭建的激光器实验系统输出的光

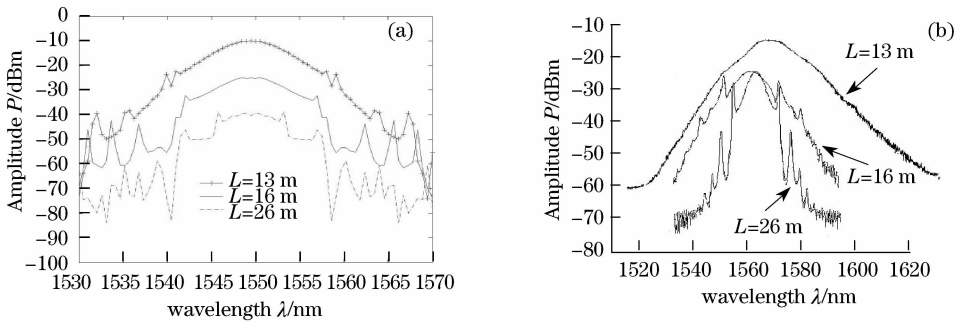


图 2 $R=10\%$, $L_g=3 \text{ m}$ 时,不同的腔体长度下仿真所得光谱图(a)实验结果(b)

Fig. 2 Simulated spectrum (a) experimental spectrum

(b) with different ring lengths when $R=10\%$ and $L_g=3 \text{ m}$

3.2 增益光纤长度对光谱边带的影响

为研究增益光纤长度 L_g 对光谱边带的影响,根据 3.1 中的结论,取腔长 13 m , $R=10\%$, L_g 分别为 0.5 m 、 1.5 m 和 3 m ,进行了光谱边带的仿真和实验研究,如图 3、图 4 所示。从图中可以看出, $L_g=1.5 \text{ m}$ 时光谱边带的幅值最强,其次为 0.5 m 的,而 3 m 的最小。即随增益光纤长度的增加,光谱边带的幅度先增加后降低,而光谱宽度逐渐增加。所以,适当地增长增益光纤有利于抑制边带和展宽光谱。但 L_g 也不是越长越好,根据仿真结果,当 L_g 超过 3.5 m 后,边带幅度会剧烈增加,因此取 $L_g=3 \text{ m}$ 对边带的抑制作用最佳。从图 4 还可以看出,当 $L_g=3 \text{ m}$ 时,光谱两边都没有出现明显的光谱边带突起,且谱宽远大于 $L_g=0.5 \text{ m}$ 和 1.5 m 的,达到了 20 nm 。根据 sech 函数脉冲近似以及傅里叶变换极限估计,对应此谱宽的脉宽约 200 fs ,但实际测得的脉宽在 ps 量级。这是因为 3 m 长的高增益光纤引入了较强的色散和啁啾效应,严重地展宽了光脉冲的宽度。因此,要在此时获得 fs 脉冲,还需要引入色散补偿措施。

取不同的腔长和增益光纤长度进行实验时,所得光谱的中心波长和功率各不相同,如图 2(b)、图 4

谱,实验参量与仿真参量一一对应,抽运功率为 60 mW 。观测光谱使用的是 ANDO6319 型光谱仪。为保证实验结果的准确性,每次测量都调整偏振控制器到最佳位置,使得光谱边带在当时的情况下最小,以减小偏振状态引入的误差。从两图中可以看出,随着腔体长度的减小,光谱边带的阶数和幅度都明显减小,且光谱宽度逐渐增大。可见减小腔体长度有利于抑制光谱边带和增宽谱宽。仿真所得光谱形状与边带数量和实验结果有一定差异,但是边带幅度和光谱宽度的变化趋势是相同的。

所示。这是因为具体实验中,每次改变参量都需要截断和重新熔接光纤,这对腔内的偏振态分布、增益光纤吸收和腔体损耗状况等特性都会带来影响,从而造成输出功率和中心波长的波动。而这种熔接带来的影响在模型仿真中没有考虑到,因此仿真结果的心波长是固定不变的,如图 2、图 4 所示。但仿真和实验结果中边带幅度和光谱宽度的变化趋势是相同的。

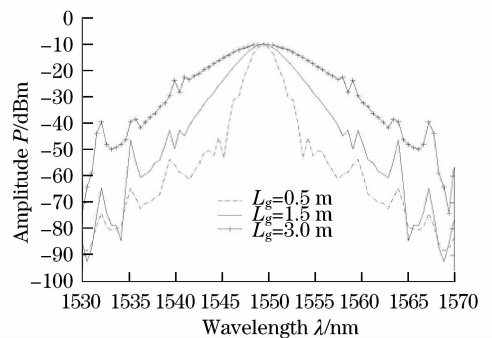


图 3 $R=10\%$, $L=13 \text{ m}$ 时,不同 L_g 的锁模脉冲光谱仿真结果

Fig. 3 Simulated spectrum with different lengths of EDF when $R=10\%$ and $L=13 \text{ m}$

3.3 耦合输出比和锁模状态对光谱边带的影响

为研究耦合输出比(R)对光谱边带的影响,基

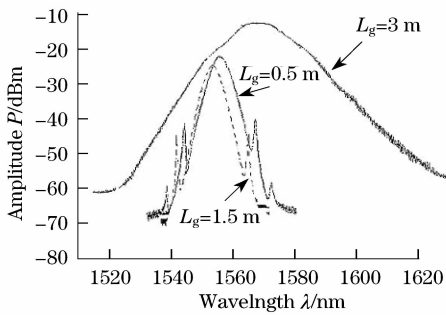


图 4 $R=10\%$, $L=13$ m 时, 输出光谱实验结果

Fig. 4 Experimental spectrum with different lengths of EDF when $R=10\%$ and $L=13$ m

使得脉冲呈现类孤子状态, 而非纯孤子脉冲, 因此脉冲与色散波之间的干涉度较小。 $R < 60\%$ 时边带幅度随 R 值的增加而增加。这是因为 R 增加时, 腔内能

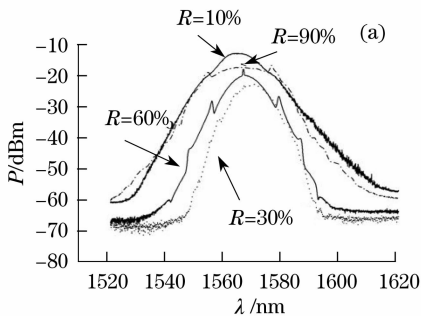


图 5 $L_g=3$ m, 腔长为 13 m 时不同耦合输出比实验激光器的输出光谱 (a) 仿真所得光谱 (b)

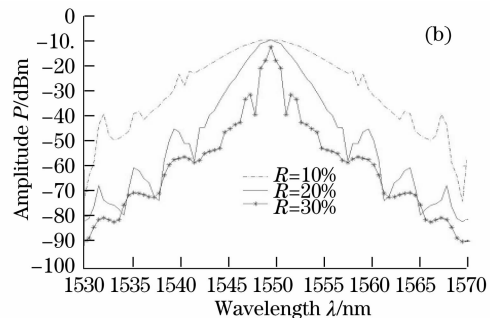
Fig. 5 Experimental spectrum (a), simulated spectrum (b) with different R when $L=13$ m and $L_g=3$ m

在不同的 R 值下进一步调节腔体偏振态获得了基阶锁模和各种高阶谐波锁模状态下的光谱。其中基阶锁模光谱形状如图 5 中 $R=10\%$ 时所示, 而谐波锁模的光谱形状类似于 $R=60\%$ 的光谱。通过实验结果的对比分析得出, 同样的腔体参量下, 基阶锁模光谱边带的幅度和阶数都小于高阶谐波锁模的。即基阶锁模比高阶锁模状态有利于光谱边带的抑制。

综上所述, 光纤激光器的腔体增益与损耗应存在一最佳比值, 对于 7.5 dB 的小信号增益系数 (此值与实验中 3 m 的 EDF 相对应), 耦合输出比取在 10~20% 间能获得较好的光谱边带抑制效果。我们取 3 m 长的增益光纤、13 m 的腔长和 10% 的耦合输出比, 获得了光谱边带抑制较好, 谱宽 20.4 nm 的脉冲激光, 如图 3、图 5 和图 6 中所示, 其基阶重复频率为 15.87 MHz, 单脉冲能量约 0.52 nJ。在室内温度变化和工作平台搬动等情况下, 脉冲幅值和光谱谱宽分别存在约 4% 和 2% 的波动, 脉冲形状和重复频率保持得很好, 未出现失锁或中心波长漂移的现象。

量逐渐减弱, 啁啾和色散效应随之减弱, 脉冲开始向孤子状态过渡, 与色散波间的相长干涉变强, 所以边带幅度逐渐变大。而 $R > 60\%$ 后, 边带幅度随着 R 的增加而减小。这是因为当耦合输出比过大时, 腔内孤子脉冲能量较低, 一定程度上限制了上述相长干涉。综合以上实验现象, 并考虑到过大的 R 值不利于光脉冲的稳定, 取 $R=10\%$ 最有利于抑制光谱边带。

$R=10\%$ 、20% 和 30% 的仿真结果如图 5(b) 所示。图中边带幅度随 R 的增大先增加后减小的趋势与实验结果相同。但仿真中 $R > 60\%$ 后的光谱都非常光滑, 与实验结果有较大差异, 这是因为实验中 $R > 60\%$ 后都需要较强的抽运功率才能获得锁模起振, 而此模型对高抽运功率带来的影响考虑不够充分, 还有待改进。



4 结 论

实验与仿真结果表明, 要抑制光谱边带, 应当适当增加增益光纤的长度, 尽量缩短腔长和采用较低的耦合输出比, 并保证激光器处在基阶锁模状态下运转。总之, 光纤激光器的腔体增益与损耗间存在一最佳比值, 对图 1 所示的环形腔被动锁模光纤激光器, 应采用 3 m 长的高增益光纤, 10% 的耦合输出比, 并尽量缩短腔长。从理论仿真和实验的结果对比看出, 基于色散波干涉理论、非线性薛定谔方程和可饱和吸收体原理建立的模型的仿真结果与实验现象吻合较好, 适用于光谱边带的模拟与分析, 下一步的研究将致力于改进模型, 以模拟高抽运功率和高耦合输出比下的光谱情况。

参 考 文 献

- Zhang Zuxing, Sang Minghuang, Ye Zhiqin *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 648~652
张祖兴, 桑明煌, 叶志清 等, 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 648~652

- 2 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *et al.*. Passively Mode-Locked Fiber Laser with a Semiconductor Saturable Absorber Mirror[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2):163~165
王 旌,张洪明,张 隳等基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):163~165
- 3 B. Ortac, A. Hideur, T. Chartier *et al.*. Generation of bound states of three ultrashort pulses with a passively mode-locked high-power Yb-doped double-clad fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(5):1274~1276
- 4 Tang D Y, B Zhao. Compound pulse solitons in a fiber ring laser [J]. *Physical Review A-Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2003, **68**(1):013816/1-013816/8
- 5 S. M. J. Kelly. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(8): 806~807
- 6 Ye Hui, Xu Wencheng, Luo Zhichao. Dispersion measurement for optical fiber in ring cavity using fiber laser sideband spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1323~1325
叶 辉,徐文成,罗智超等,利用光纤激光器光谱边带效应测量光纤色散[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1323~1325
- 7 L. D. Michael, I. N. Dining III. Experimental study of sideband generation in femtosecond fiber lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(6):1469~1477
- 8 F. M. Mitschke, L. F. Mollenauer. Experimental observation of interaction forces between solitons in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(3):355~357
- 9 K. Smith, L. F. Mollenauer. Experimental observation of soliton interaction over long fiber path: Discovery of along-range interaction[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **12**(10):1284~1286
- 10 L. F. Mollenauer, J. P. Gordon, M. N. Islam. Soliton propagation in long fibers with periodically compensated loss[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **22**(2):157~173
- 11 Yang Xianglin Wen Yangjing. *Fundamental Theories of Optical Fiber Soliton Communications*[M]. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, 2000, 114-119
杨祥林,温扬敬. *光纤孤子通信理论基础*[M]. 北京:国防工业出版社, 2000, 114~119
- 12 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 26-30, 94-100, 381-391
Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方等译 北京:电子工业出版社, 2002, 26-30, 94-100, 381-391