

文章编号: 1001-3806(2010)03-0425-04

复合腔锁模激光器超模噪声问题的研究

张静, 方致霞, 李敬仕

(安徽邮电职业技术学院 通信工程系, 合肥 230031)

摘要: 为了研究复合腔抑制超模噪声的问题, 基于传输函数法建立了复合腔等效结构模型, 从理论上分析了复合腔主动锁模光纤激光器的结构特性, 论证了等效复合腔基频与两子腔腔长的关系。在1GHz射频调制频率下, 给出了复合腔各参量与超模噪声的关系。结果表明, 复合腔可以减小超模数目, 超模噪声的抑制与单腔相比并不具有优势。该结果对复合腔主动锁模光纤激光器的实验研究有一定的参考意义。

关键词: 激光器; 主动锁模; 复合腔; 超模噪声

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.039

Theoretical analysis of supermode noise in mode-locked fiber laser with composite cavity

ZHANG Jing, FANG Zhi-xia, LI Jing-shi

(Department of Communication Engineering, Anhui Vocational and Technical Institute of Posts and Telecommunications, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to study the supermode noise suppression in a mode-locked fiber laser with composite cavity, an effective structure model of the composite cavity was built based on the transfer function. The characteristic of an active mode-locked ring fiber laser with composite cavity was investigated theoretically. The dependence of the effective basic frequency of the composite cavity on the length of two sub-cavities was demonstrated in detail. Setting the RF modulation frequency at 1GHz, the relation between the supermode noise and parameters of the composite cavity were listed in a table. It was shown that the number of supermodes was reduced; however, the reduction of overall supermode noise was not remarkable in comparison with the standard single-cavity configuration. The result is helpful for experimental study of supermode noise of active mode-locked ring fiber laser with composite cavity.

Key words: lasers; active mode-locked; composite cavity; supermode noise

引言

超短光脉冲是实现光时分复用/波分复用技术的理想光源, 同时也是非线性光学、瞬态光学研究方向的前沿课题。主动锁模光纤激光器因其具有可输出变换极限、啁啾小、调谐范围大、高重复频率脉冲等优点, 在高速光纤通信系统、传感、光谱学医学领域有着重要的实用价值。利用有理数谐波锁模技术还可以突破电子瓶颈的限制, 产生几百吉赫兹的光脉冲^[1-2]。当前影响主动锁模激光器应用的一个主

要问题就是稳定性。超模噪声是造成激光器短期不稳定的一个重要因素。主动锁模激光器的腔长一般为几十米到几百米, 纵模间隔在兆赫兹量级。为了获得高重复频率超短脉冲, 激光器工作在高次($N \gg 100$)谐波锁模状态下。 N 越大, 超模组数越多, 超模竞争越严重, 结果导致输出光脉冲振幅随时间抖动。为了使锁模纤激光器稳定工作, 应该使其中的一组超模占优势, 而其它的超模则需抑制掉。目前抑制超模噪声的方法主要包括腔内滤波法^[3-4]、基于非线性偏振旋转 (nonlinear polarization rotation, NPR) 的加成脉冲限制 (additive pulse limiting, APL) 法^[5-6]、基于半导体镜的双光子吸收法^[7]、自相位调制 (self-phase modulation, SPM) 法^[8]、复合腔法等^[9-10]。HU^[11]等人采用复合腔结构, 获得基频 34MHz、脉宽 37ps 的 72 阶谐波锁模脉冲, 但是超模噪声抑制效果不明显。

基金项目: 安徽省高等学校省级自然科学基金项目资助项目 (KJ2009B193Z)

作者简介: 张静 (1983-), 女, 硕士, 现主要从事锁模激光器方面的研究。

E-mail: jingzhang0311@163.com

收稿日期: 2009-05-08; 收到修改稿日期: 2009-07-31

1 复合腔结构分析

1.1 Vernier 定理

设激光器腔长为 L , 相邻两纵模之间间隔(基频) $\Delta\nu$ 可表示为:

$$\Delta\nu = c/(n_c L) \tag{1}$$

式中, c 为光速, n_{eff} 为光纤回路有效折射率(1.45 左右)。复合腔经两个 3dB 耦合器接入环形腔内。复合腔由两个子腔(腔长分别为 L_1, L_2) 构成, 且子腔的腔长满足关系式: $L_2 = L_1 + \Delta L$ 。

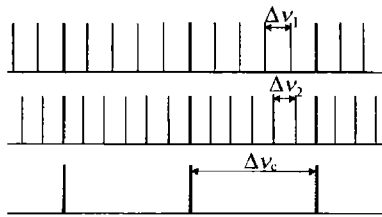


Fig. 1 Schematic view of the composite cavity

图 1 是复合腔原理图。设两子腔的纵模间隔分别为 $\Delta\nu_1, \Delta\nu_2$ ($\Delta\nu_2 < \Delta\nu_1, \Delta L > 0$)。如 $\Delta L \ll L_1, L_2$, 即 $L_2 \approx L_1$, 由(1)式可知 $\Delta\nu_1 \approx \Delta\nu_2$ 。假定 $\Delta\nu_c$ 是 $\Delta\nu_1$ 和 $\Delta\nu_2$ 的最小公倍数, 则有:

$$\Delta\nu_c = N_1 \Delta\nu_1 = N_2 \Delta\nu_2 \tag{2}$$

式中, N_1, N_2 是满足(2)式的最小整数, 且 N_1 和 N_2 互质。 $\Delta\nu_c$ 即复合腔的等效基频。超模噪声是与谐波锁模相伴而生的, 谐波锁模阶数越高, 可能起振的超模组数就越多, 超模噪声越大。当调制频率 f_m 一定时, 腔的等效基频越大, 谐波锁模阶数越低, 则超模组数越少。复合腔的等效基频大于任意一个子腔的基频, 所以复合腔可以减少超模组数, 从而抑制超模噪声。减小谐波锁模阶数, 即减小超模组数 N , 从而抑制超模噪声, 这是复合腔抑制超模噪声的基本思想。由(1)式、(2)式可知, $\Delta\nu_c$ 的大小由 L_1, L_2 共同决定。在极限情况下, $\Delta\nu_c = f_m$, 此时 $N = 1$ 。由于 $\Delta\nu_c$ 越大, 腔长越短, 在实际实验中很难实现。

1.2 复合腔等效模型

为了研究光经过复合腔后的透射率, 简化得到如图 2 所示的两个子腔, 腔长分别为 L_1, L_2 ($L_1 = l_1 + l_0$,

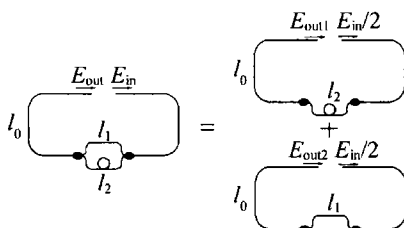


Fig. 2 Equivalent figure of the composite cavity

$L_2 = l_2 + l_0$)。假设整个腔的增益等于损耗, 腔内运行的激光为单频光, 输入光场表示为 $E_{\text{in}} = E_i \exp(j\omega t)$, 其中, E_i 为输入光场的振幅($E_i > 0$), ω 为光的角频率。相应的输出光场应有如下形式 $E_{\text{out}} = E_o \exp[j(\omega t - \varphi)]$, 其中, E_o 为输出光场的振幅($E_o > 0$), φ 为输出光相位。复合腔由两个 3dB 耦合器接入腔内, 光被分两路经过 l_1, l_2 段距离后, 输出光场^[12]可表示为:

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{out1}}(t) + E_{\text{out2}}(t) = \frac{1}{2} E_{\text{in}}(t - \frac{n_{\text{eff}} l_1}{c}) + \frac{1}{2} E_{\text{in}}(t - \frac{n_{\text{eff}} l_2}{c}) \tag{3}$$

化简(3)式得:

$$E_{\text{out}}(t) = E_i \cos\left(\omega \frac{n_{\text{eff}} \Delta L}{2c}\right) \exp[j(\omega t - \omega n_{\text{eff}} L_{\text{mode}}/c)] \tag{4}$$

式中, $\Delta L = L_2 - L_1 = (l_2 + l_0) - (l_1 + l_0) = l_2 - l_1$; $L_{\text{mode}} = (L_1 + L_2)/2$ 。因为 $E_o > 0$, 由(4)式可知, 输出光场的相位 φ 应有如下取值(m 为整数):

$$\begin{cases} \varphi = \frac{\omega n_{\text{eff}} L_{\text{mode}}}{c}, (2m\pi - \frac{\pi}{2} \leq \frac{\omega n_{\text{eff}} \Delta L}{2c} \leq 2m\pi + \frac{\pi}{2}) \\ \varphi = \frac{\omega n_{\text{eff}} L_{\text{mode}}}{c} + \pi, (2m\pi + \frac{\pi}{2} \leq \frac{\omega n_{\text{eff}} \Delta L}{2c} \leq 2m\pi + \frac{3\pi}{2}) \end{cases} \tag{5}$$

满足 $\varphi = 2q\pi$ (q 为整数) 的模式频率可表示为:

$$\begin{cases} f = q \Delta\nu_{\text{mode}}, ((2m - \frac{1}{2}) \Delta\nu_1 \leq f \leq (2m + \frac{1}{2}) \Delta\nu_1) \\ f = (q - \frac{1}{2}) \Delta\nu_{\text{mode}}, ((2m + \frac{1}{2}) \Delta\nu_1 \leq f \leq (2m + \frac{3}{2}) \Delta\nu_1) \end{cases} \tag{6}$$

式中, $\Delta\nu_{\text{mode}} = \frac{c}{n_{\text{eff}} L_{\text{mode}}} = \frac{2\Delta\nu_1 \Delta\nu_2}{\Delta\nu_1 + \Delta\nu_2}$ 。若腔长满足 $L_1 \approx L_2 \approx L_{\text{mode}}$, 则有以下几式成立:

$$\Delta\nu_1 \approx \Delta\nu_2 \approx \Delta\nu_{\text{mode}}; \Delta\nu_2 < \Delta\nu_{\text{mode}} < \Delta\nu_1; \frac{L_{\text{mode}}}{\Delta L} \gg 1 \tag{7}$$

两个子腔的模式频率分别为 $\Delta\nu_1, \Delta\nu_2$ 。由(7)式可以假定复合腔内相邻两个模式之间频率间隔为 $\Delta\nu_{\text{mode}}$ 。复合腔相当于一个马赫-曾德尔干涉仪, 其透射率函数如下^[11]:

$$T_t = [1 + \cos(2\pi f/\Delta\nu_1)]/2 \tag{8}$$

式中, $\Delta\nu_1 = c(n_{\text{eff}} \Delta L)^{-1}$ 。对频率进行归一化, 令 $F = \Delta\nu_1/\Delta\nu_{\text{mode}}$ 。下面讨论 F 取值对复合腔等效基频 $\Delta\nu_c$ 的影响。

(1) $F = R + 1/2$ (R 为正整数)。假定 $R = 10$, 得到如图 3a 所示的透射曲线。满足 $T_t = 0$ 的点组成一系列的频段。在第 1 频段内, $f/\Delta\nu_{\text{mode}} = q$, 在第 2 频段内, $f/\Delta\nu_{\text{mode}} = q - 1/2$, 依次类推, 相邻两频段之间的模式频率相差 $1/2$ 。图中(垂直线)只标出了最大透射率

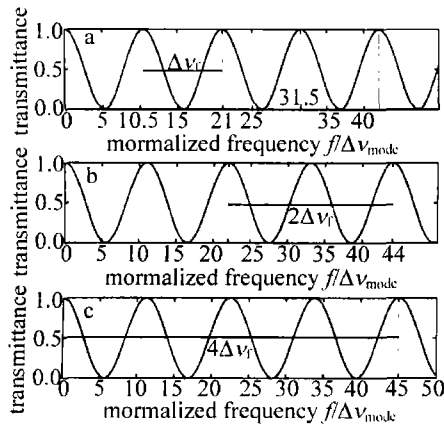


Fig. 3 The transmission curve of the composite cavity

处的模式。假定只有满足最大透射率的模式才能起振,则复合腔的基频满足下式:

$$\Delta\nu_c = \Delta\nu_f = (R + 1)\Delta\nu_2 = R\Delta\nu_1 \quad (9)$$

(2) $F = R + \frac{1}{2} + \frac{K}{S}$ (R, S, K 为正整数,且 K 与 S

互质)。假定 $R = 10, S = 2, K = 1$, 得到如图 3b 所示的透射曲线。此时复合腔基频 $\Delta\nu_c = 2\Delta\nu_f$ 。假定 $R = 10, S = 4, K = 3$, 如图 3c 所示。同理 $\Delta\nu_c = 4\Delta\nu_f$ 。复合腔基频满足下式:

$$\Delta\nu_c = S\Delta\nu_f = [(R + 1)S + K]\Delta\nu_2 = (RS + K)\Delta\nu_1 \quad (10)$$

(3) F 为无理数,即不存在满足条件(2)的整数,即 $\Delta\nu_c = \infty$ 。因为 $\Delta\nu_f$ 有限,对比条件(2)可知 $S = \infty$ 。

(4) 在条件(1)中假定只有满足最大透射率的模式才能起振,而实际情况并非如此。在最大透射率附近的模式也会起振。从图 4 可以看出,随着 F 的减

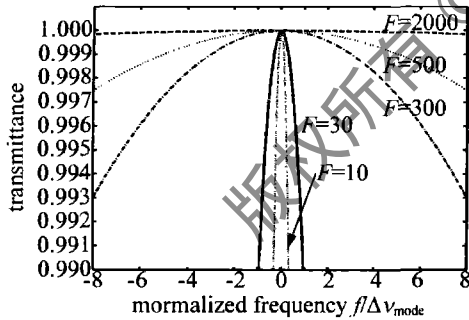


Fig. 4 The transmission curve of the composite cavity (near the maximum transmittance)

少,透射谱线宽度明显减小。当 $F = 10$ 时,透射率下降到 0.99 时,谱线宽度 $\delta\nu \ll 1$ 。

2 复合腔抑制超模噪声

2.1 超模噪声抑制

由复合腔理论可知,并不是只有位于透射率最大值处的模式才能起振,在最大透射率附近一定频率范围内的模式也会起振,因此,由 Vernier 定理分析了一种理想状态下复合腔的模式分布。参考文献

[11] 中超模噪声抑制效果并不理想。为了精确判断超模噪声的抑制效果^[13],引入信噪比这个参量,可表示为:

$$\eta_{\text{SNR}} = -10\log\left\{\frac{\left(\frac{1}{M}\sum_{i=1}^M P_i\right)}{P_{\text{carrier}}}\right\} \quad (11)$$

式中, $M = \frac{f_{\text{mode}}}{\Delta\nu_{\text{mode}}}$, M 为调制频段内存在的模式数, P_i 为调制频段内每个模式的光功率, i 为模式的序数。 P_{carrier} 为中心模的光功率。根据以上分析,下面来讨论参量 $F, \Delta\nu_c, \Delta\nu_{\text{mode}}$ 对复合腔内模式的影响。

(1) 参量 F 。由分析可知 F 越小,透射曲线的透射峰越尖锐,最大透射率附近起振的模式越少。当 $F = 10$ 时,透射率下降到 0.99 时,谱线宽度 $\delta\nu \ll 1$ 。

(2) 参量 $\Delta\nu_c$ 。 $\Delta\nu_c = S\Delta\nu_f$ 。 $\Delta\nu_f$ 一定时, S 越大,相邻两透射率极大值的频率间隔越大。

(3) 参量 $\Delta\nu_{\text{mode}}$ 。调制频率一定时, $\Delta\nu_{\text{mode}}$ 越大, M 越小。 M 的减小意味着 $f_{\text{mode}} \sim 2f_{\text{mode}}$ 频段内模式数目减小, (11) 式中的 $\left(\frac{1}{M}\sum_{i=1}^M P_i\right)$ 值减小,因此信噪比提高。

这与参考文献[13]中模拟结果(激光器的信噪比随着 M 值的减小而增加)吻合。综上所述, F 越小, $\Delta\nu_c$ 越大, $\Delta\nu_{\text{mode}}$ 越大,复合腔内模式越少。

2.2 超模噪声抑制模拟分析

主动锁模光纤激光器调制频率 f_{mode} 与纵模间隔(基频) $\Delta\nu_f$ 满足下式:

$$f_{\text{mode}} = N\Delta\nu_f = Nc/(n_{\text{eff}}\Delta L) \quad (12)$$

式中, N 为锁模阶数。设调制器的调制频率为 1GHz, 谐波锁模阶数 $N = 24, n_{\text{eff}} = 1.45, \Delta L$ 一定(5m), 分析 1GHz ~ 2GHz 这一频段内超模噪声抑制的情况。令 $R = 9, K = 1, 9.5 < F_{\text{mode}} < 10$, 当调制器频率为 1GHz, 微调 $L_{\text{mode}}, \Delta\nu_c$ 变化较大, M 没有明显变化。表 1 为复合腔各参量一览表。从表中可以看出, ΔL 一定时, $\Delta\nu_f$ 一定(41.379MHz)。通过微调 L_{mode} (48m ~ 47.70m) 可以得到较大的 $\Delta\nu_c$ (413.79MHz ~ 1034.4MHz), 此时 $\Delta\nu_c \approx f_{\text{mode}}$ 。根据 Vernier 定理,在理想状态下复合腔的模式只有一组,其它组超模将被抑制掉,实现超模噪声的抑制。在最大透射率附近一定频率范围内的模式也会起振,而且 M 值没有明显变化。复合腔可以减少超模的个数,但对超模噪声的抑制与单腔相比并不具有优势。这是因为主动锁模激光器的信噪比与调制频段内模式平均功率有关,尽管调节 L_{mode} 可以使等效基频增大,但 M 值变化不大,因此抑制超模噪声效果不明显。

Table 1 Parameter of the composite cavity

S	F	L_{mode}/m	$\Delta L/\text{m}$	$\Delta\nu_{\text{mode}}/\text{MHz}$	$\Delta\nu_{\text{r}}/\text{MHz}$	$\Delta\nu_{\text{e}}/\text{MHz}$	M	$f_{\text{mode}}/\text{GHz}$
10	9.6	48	5	4.310	41.379	413.79	232	1
20	9.55	47.75	5	4.333	41.379	827.58	231	1
25	9.54	47.70	5	4.337	41.379	1034.4	231	1

3 结论

主要研究了复合腔主动锁模激光器的结构。基于传输函数法建立了复合腔等效结构模型,从理论上分析了复合腔主动锁模激光器的结构特性。详细论证了等效复合腔基频与两子腔腔长的关系。在1GHz射频频调制频率下,给出了复合腔各参量与超模噪声的关系。结果表明,复合腔可以有效减小超模数目,超模噪声的抑制与单腔相比并不具有优势,对主动锁模激光器走向实用化有一定的参考意义。

参考文献

- [1] YOSHIDA E, NAKAZAWA M. 80 ~ 200GHz erbium doped fiber laser using a rational harmonic mode locking technique [J]. Electron Lett, 1996, 32(18): 1370-1372.
- [2] ZHAO Y, LIU Y Z, ZHAO D S, *et al.* Evolution of mode-locked technology of fiber lasers [J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 162-165 (in Chinese).
- [3] HARVEY C T, MOLLENAUER L F. Harmonically mode-locked fiber ring laser with an internal Fabry-Perot stabilizer for soliton transmission [J]. Opt Lett, 1993, 18(2): 107-109.
- [4] DEPRIEST C M, YILMAZ T, ETAMAD S, *et al.* Ultralow noise and supermode suppression in an actively mode-locked external-cavity semiconductor diode ring laser [J]. Opt Lett, 2002, 27(9): 719-721.
- [5] DOEER C R, HAUS E P, IPPEN E P, *et al.* Additive pulse limiting [J]. Opt Lett, 1994, 19(1): 31-33.
- [6] LI Y H, LOU C Y, WU J, *et al.* Novel method to simultaneously compress pulses and suppress supermode noise in actively mode-locked fiber ring laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(9): 1250-1252.
- [7] THOEN E R, GREIN M E, KOONTZ E M, *et al.* Stabilization of an active harmonically mode-locked fiber laser using two-photon absorption [J]. Opt Lett, 2000, 25(13): 949-950.
- [8] NAKAZAWA M, TAMURA K, YOSHIDA E. Supermode noise suppression in a harmonically modelocked fiber laser by self-phase modulation and spectral filtering [J]. Electron Lett, 1996, 32(4): 461-463.
- [9] ONODERA N. Supermode beat suppression in harmonically mode-locked erbium-doped fiber ring lasers with composite cavity structure [J]. Electron Lett, 1997, 33(11): 962-963.
- [10] POTTIEZ O, DEPARIS O, HAELTERMAN M, *et al.* Experimental study of supermode noise of harmonically mode-locked erbium-doped fiber lasers with composite cavity [J]. IEEE J Q E, 2002, 38(3): 161-167.
- [11] HU Z Y, DING Y K, JIA D F, *et al.* Supermode noise suppression in harmonically mode-locked fiber lasers with composite cavity [J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(5): 645-647 (in Chinese).
- [12] AGRAWAL G P. Applications of nonlinear fiber optics [M]. San Diego: Academic Press Incorporated, 2001: 414.
- [13] BILBO T J, DONKOR E. Modeling of noise in actively and passively mode-locked fiber laser systems [J]. Proc SPIE, 2003, 5104: 33-39.

(上接第408页)

通过很多示例的运行结果来看,本程序具有很好的普适性和正确的运行结果,光学设计中需要求出的所有像差值都能从本程序的运行中得到。下一步需要做的工作就是把各种像差的运行结果用像差曲线表示出来,使读者一目了然,而再进一步的工作就是进行像差自动校正程序的设计。

参考文献

- [1] XIONG D P, HE Zh P. The optical path calculation and analysis of a sphere surface optical system [J]. Optical Instruments, 2004, 26(4): 45-47 (in Chinese).
- [2] XU Ch, MA X M, LIU J S. Analysis of tracks of light rays in dual-stage wedge type fiber optical isolator [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 455-458 (in Chinese).
- [3] WANG F, ZHU Q H, JIANG D B, *et al.* Analysis of system aberration influenced by the lens tilt in a multi-pass amplifier [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 333-336 (in Chinese).
- [4] QU E Sh, YANG Zh, WANG G, *et al.* Combining binary optics with achromats to revise secondary spectrum [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11): 2274-2278 (in Chinese).
- [5] TIAN J Y, GONG M L, YAN P, *et al.* The design of bi-aspherical single objective lens with numerical aperture of 0.85 [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 116-118 (in Chinese).
- [6] SHEN W M, XUE M Q. Aberration analysis and optical design of aspheric spectacle lens [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(6): 744-747 (in Chinese).
- [7] SAWADA H, SANNOMIYA T, HOSOKAWA F, *et al.* Measurement method of aberration from Ronchigram by autocorrelation function [J]. Ultramicroscopy, 2008, 108(11): 1467-1475.
- [8] YUAN X C. Optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 11-38 (in Chinese).
- [9] YUAN X C. Modern optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995: 160-161 (in Chinese).