

有理数谐波锁模掺铒光纤环形激光器

王 林* 于晋龙 马晓红 杨恩泽 张以谟 黄 超 李世忱

(天津大学国家教育部光电子信息工程开放实验室 天津 300072)

提要 在主动谐波锁模光纤环形激光器实验中获得数倍于调制频率 f_m 的高重复率脉冲序列, 其中 $f_p = 2f_m$ 的输出脉冲序列极为稳定, 所得的最高锁模脉冲重复频率 $f_p = 4f_m \approx 6 \text{ GHz}$ 。实验证实了一种被称之为有理数谐波锁模(RHML—Rational Harmonic Mode-locking)新技术在较低的调制频率和极简单的腔构条件下也同样成立。实验观察到 RHML 激光器允许失谐范围不小于 $\pm 2 \text{ kHz}$, 失谐比大于 10^{-6} 。

关键词 有理数谐波锁模, 掺铒光纤激光器, 微失谐调制

1 引 言

高重复率超短光脉冲激光器是未来超高速大容量光纤通信所不可缺少的信号源, 在目前众多有潜力的光源中, 主动谐波锁模掺铒光纤环形激光器(HML-EDFL)倍受重视。它与半导体激光器相比, 具有输出脉宽窄、峰值功率高、脉冲质量好, 以及重复频率稳定并能方便地在很宽的速率范围内(1~ 100 GHz)产生高质量皮秒脉冲序列^[1]。由于主动锁模光纤激光器不仅谐振腔结构灵活, 可采用各种技术来达到稳定输出光脉冲的目的^[2], 而且中心波长易于调谐, 能直接产生无频率啁啾的近变换极限光脉冲, 因而很适合作为线性高速光纤通信系统和光孤子通信系统的光源。

通常使主动谐波锁模激光器的调制频率 f_m 等于谐振腔的谐振基频(纵模间隔) f_{bsc} 的整数倍($f_m = mf_{\text{bsc}}$), 由此得到输出重复频率为 $f_p = f_m$ 的脉冲序列。最近在激光器方面出现了一项引人注目的新技术, 即有理数谐波锁模(RHML)技术。该技术首先由墨尔本大学 Onodera 等于 1993 年进行主动锁模半导体激光器实验时, 通过微失谐调制 ($f_m \neq mf_{\text{bsc}}$), 产生倍速率 (nf_m) 的高重复率光脉冲^[3]。1996 年他们以及日本的 Yoshida 等先后在 HML-EDFL 中获得 RHML 运转^[4]。随后 Yoshida 等用 40 GHz 的调制频率获得 80~ 200 GHz 速率的输出脉冲序列^[5]。最近我们在主动谐波锁模掺铒光纤环形激光器上, 用 1 GHz 量级较低速率的调制频率, 成功地获得 1~ 4 阶谐波锁模输出脉冲序列, 获得的最高重复频率约为 6 GHz。

* 通信地址: 天津大学精密仪器与光电子工程学院。

收稿日期: 1998-06-26; 收到修改稿日期: 1998-08-07

2 实 验

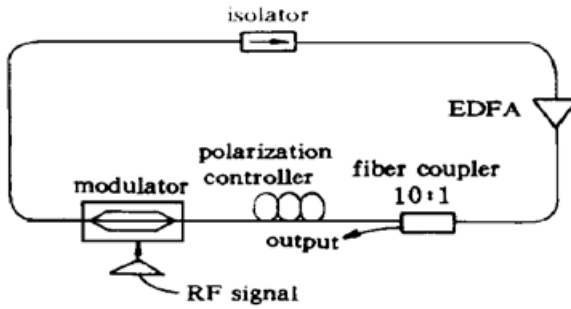


图 1 主动谐波锁模掺铒光纤环形激光器结构示意图

Fig. 1 Experimental setup of an ultra-high repetition rate erbium doped fiber laser with rational harmonic mode-locking

实验装置如图 1 所示,在不加调制信号时测出腔基频 $f_{\text{bsc}} \approx 7.97 \text{ MHz}$, 因 $f_{\text{bsc}} = C/\mu L$, 所以环形腔光学腔长 $L \approx 17 \text{ m}$ 。实验中所用的 LiNbO_3 强度调制器带宽为 $0 \sim 3 \text{ GHz}$, 半波电压 $V_\pi \approx 3.6 \text{ V}$, 射频驱动电路(RF)将误码仪所产生的正弦信号放大使其峰值电压 $V_{p-p} \geq 4 \text{ V}$ 以作为光调制器的驱动电源, 误码仪频带宽度为 $1 \text{ MHz} \sim 1.4 \text{ GHz}$, 步频为 2 kHz , EDFA 的输出功率为 2 mW 。实验时光调制器基本工作在线性区, 仔细调节调制器的直流偏压, 当直流偏压 $V_{\text{bias}} = 5.7 \text{ V}$ 时, 效果较好。经多次实验得出有理数谐波锁模时的调制频率 f_m 与激光器输出脉冲的重复频率 f_p 满足以下两式

$$f_m = (m \pm 1/n)f_{\text{bsc}} \quad (1)$$

$$f_p = n f_m = (mn \pm 1)f_{\text{bsc}} \quad (2)$$

(1) 和(2) 式中的 m, n 为正整数, 这与文献[5]所报道的结果相同, 不同之处是我们发现维持某阶光脉冲输出的 RHML 允许调谐范围为 $\pm 2 \text{ kHz}$ 。当(1) 式中的 $n = 1$ 时, 例如 $f_{m1} = (173 + 1)f_{\text{bsc}} = 1.393 \text{ GHz}$ 时, $f_p = f_{m1}$, 即通常的谐波锁模状态。而当 $n = 2$ 时, 例如 $f_{m2}^+ = (174 + 1/2)f_{\text{bsc}} = 1390 \text{ MHz}$ 或 $f_{m2}^- = (174 - 1/2)f_{\text{bsc}} = 1382.64 \text{ MHz}$ 时, 出现 RHML 运转, 其所对应的输出重复频率分别为 $f_{p2}^+ = 2f_{m2}^+ = (2 \times 174 + 1)f_{\text{bsc}} = 2.782 \text{ GHz}$ 和 $f_{p2}^- = 2f_{m2}^- = (2 \times 174 - 1)f_{\text{bsc}} = 2.765 \text{ GHz}$ 。实验结果表明不论 m 为何值, RHML 的阶数只取决于 n 。图 2(a) ~ (d) 分别表示 $n = 1, 2, 3, 4$ 即从无失谐调制到失谐量为 $f_{\text{bsc}}/2, f_{\text{bsc}}/3$ 和 $f_{\text{bsc}}/4$ 时激光器输出的 1~ 4 阶 RHML 脉冲序列。

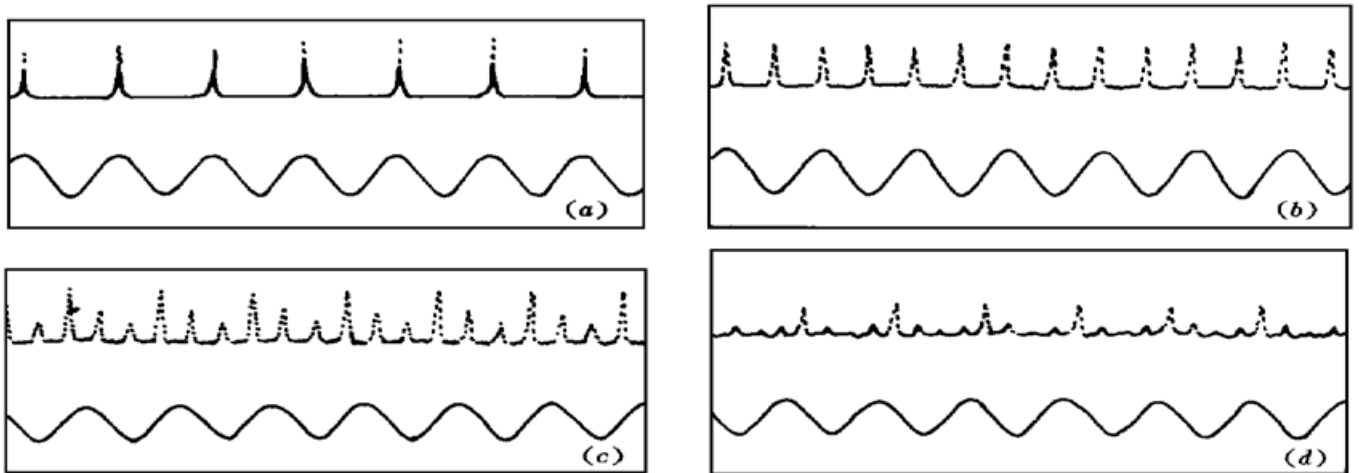


图 2 RHML-EDFL 输出 1 阶(a), 2 阶(b), 3 阶(c) 和 4 阶(d) 脉冲序列

Fig. 2 First (a), second (b), third (c) and fourth (d) rational harmonic mode-locking

3 实验结果和讨论

RHML 谐波锁模技术产生输出脉冲重复频率倍增现象的物理图像是腔内的循环脉冲与调制器产生的周期性损耗均衡作用所致。当调制频率与腔体的谐振频率不一致即存在一个失谐量 f_{bsc}/n 时, 它对腔内所运行脉冲的影响表现为引入一个附加相移 ϕ , 这也就相当于对腔内所有振荡脉冲引入一个延时, 该相移的多少或延时的大小与失谐量 n 的关系为振荡脉冲在腔内运行一周后所产生的附加相移等于 $2\pi/n$ 即产生 T/n (T 为调制器的调制周期) 的延时。虽然 LiNbO_3 强度调制器对腔内相邻脉冲运行一周后的调制幅度并不相等, 但经过 n 周运行后腔内所有脉冲所得到的附加相移为 2π , 这时它们受到腔体的作用接近一致, 故使得腔内所有调制峰均得到相同的增益而趋于相等。从时域上看腔内振荡脉冲所受到的增益和损耗是交替均衡进行的, 腔内所有振荡脉冲只有运行 n 周后才可产生等幅脉冲输出。因此 RHML 造成延时的效果是使腔内运行的脉冲个数加倍, 从而导致输出脉冲重复频率随着 n 增加而成倍地增加。从图 2(c), (d) 看出 RHML 输出高阶脉冲序列的幅度涨落较大, 这有可能是超模噪声所为。

4 结 论

本文在低调制频率 ($\sim 1.4 \text{ GHz}$) 和极简单腔结构 (未加光学滤波器) 的短腔长主动锁模掺铒光纤环形激光器上成功实现了有理数谐波锁模实验, 证实了各阶 RHML 现象的存在。实验结果表明 2 阶 RHML 的稳定性很好, 3 阶和 3 阶以上的 RHML 稳定性较差, 所得最高输出脉冲重复频率为 4 阶 RHML 即 $f_p = 4f_m \approx 6 \text{ GHz}$, 并发现维持 2~4 阶 RHML 脉冲输出的可调谐范围为 $\pm 2 \text{ kHz}$, 即获得优于 10^{-6} 的可调谐范围, 这比文献[5]所得到的结果要好许多。由此我们得出 RHML 不仅在带有光学滤波器的长腔长 (90 m) 环形腔中通过较高驱动频率 ($f_m > 10 \text{ GHz}$) 能获得运转, 而且也能在较低的驱动频率 ($f_m < 2 \text{ GHz}$) 范围内, 在短腔长 (17 m) 和极简单腔结构 (不带光学滤波器) 条件下, 实现 RHML 运转, 且较文献[5]所报道的更易实现 RHML, 所获得的输出脉冲波形与[5]基本相同。由于 RHML 只需对调制器的驱动频率改变一个较小量 (有理数失谐量) 就可使输出脉冲重复频率成倍改变, 因此该技术非常有用, 它克服了主动锁模激光器输出最高重复频率受调制器和驱动电源上限频率限制的不足, 从而成为获得高重复率光脉冲序列的一种既较为经济又简单易行的新方法。目前在抑制 RHML-EDFL 高阶输出脉冲幅度波动方面正在取得一些新进展^[6], 随着超大容量的 WDM/OTDM 日趋商业化, RHML-EDFL 极有可能在全光纤超连续脉冲光源中扮演重要角色, 并对超高速大容量光纤通信产生积极影响。

参 考 文 献

- 1 Eiji Yoshida, Masataka Nakazawa. Low-threshold 115-GHz continuous-wave modulational-instability erbium-doped fiber laser. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(18): 1409~ 1411
- 2 M. Nakazawa, E. Yoshida, K. Tamura. Ideal phase-locked-loop (PLL) operation of a 10 GHz erbium-doped fibre laser using regenerative modelocking as an optical voltage controlled oscillator. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(15): 1318~ 1320
- 3 N. Onodera, A. J. Lowery, L. Zhai *et al.*. Frequency multiplication in actively mode-locked semiconductor lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(12): 1329~ 1331
- 4 Z. Anmed, N. Onodera. High repetition rate optical pulse generation by frequency multiplication in actively modelocked fibre ring laser. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(5): 455~ 457
- 5 E. Yoshida, M. Nakazawa. 80~ 200 GHz erbium-doped fibre laser using a rational harmonic mode-lock

ing technique. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15): 1370~ 1372

- 6 Min-Yong Jeon, Hak Kyu Lee, Joon Tae Ahn *et al.*. External fiber laser based pulse amplitude equalisation scheme for rational harmonic modelocking in a ring-type fibre laser. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(2): 182 ~ 184

A 1. 4~ 6 GHz Erbium Doped Fiber Laser Using the Rational Harmonic Mode-locking Technique

Wang Lin Yu Jinglong Ma Xiaohong

Yang Enze Zhang Yimo Huang Chao Li Shichen

(*Tianjin University, Electronics & Information Engineering College, Tianjin 300072*)

Abstract We demonstrate rational harmonic mode-locking (RHML) in a very simple cavity Er-fiber ring laser. Using RHML the authors succeeded in obtaining the optical pulses at a repetition rate (f_m) which is multiples of the RF drive frequency ($f_m \approx 1.4$ GHz) with a detuning ratio of $> 10^{-6}$. The generation of the maximum frequency was about 6 GHz and the stable rational harmonic mode-locking occurs only at $f_b = 2f_m$. The experiment shows that the RHML technique is feasible in a short and very simple cavity Er-fiber laser.

Key words rational harmonic mode locking, fiber laser, optical modulation