

# 非线性放大复合环形镜及被动锁模 掺铒光纤激光器的研究\*

黄志坚 孙军强 黄德修

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

**提要** 提出采用两个光纤耦合器构成具有复合环的非线性放大环形镜。分析表明,改变构成非线性放大复合环形镜的光纤耦合器的耦合系数可以改变非线性复合光纤环形镜的非线性传输特性,调节非线性光反射和透射率。采用非线性放大复合环形镜与半导体饱和吸收体组成复合腔掺铒光纤激光器,获得了十分稳定的被动锁模脉冲输出,得到了重复频率为 248 MHz 的谐频锁模脉冲序列。实验表明,采用非线性放大复合环形镜构成复合腔光纤激光器,有可能获得高重复频率的锁模脉冲。

**关键词** 非线性放大复合环形镜,被动锁模,掺铒光纤激光器

## 1 引 言

非线性光纤环形镜由于其优越的光开关性能,在高速信号处理和全光通信中具有十分广阔的应用前景<sup>[1~6]</sup>。利用非线性光纤环形镜作为等效快速饱和吸收体,在光纤激光器,尤其是在掺铒光纤激光器中已能产生皮秒甚至飞秒量级的超短光脉冲<sup>[7~10]</sup>。非线性光纤环形镜的基本工作原理为<sup>[3]</sup>:将一个光纤耦合器的两个输出端相连,构成一个 Sagnac 光纤干涉环,当一束光从光纤耦合器的一个输入端入射时,将在 Sagnac 光纤环中形成两束相向传输的光,如果这两束光具有不同的光强,由于光纤的非线性 Kerr 效应,相向传输的两束光将获得不同的非线性相移,形成非线性相移差,当入射光较弱时,非线性相移差很小,入射光将从入射端反射回去,如果入射光很强,非线性相移差达到  $\pi$ ,入射光将从耦合器的另一个端口全部透射。根据获得不等光强的方法不同,非线性光纤环形镜可以分成非线性光学环形镜(NOLM)<sup>[11]</sup>和非线性放大环形镜(NALM)<sup>[14]</sup>两种。基于同样的工作原理,本文提出利用两个光纤耦合器组成了具有复合环结构的非线性放大环形镜。采用传输矩阵方法对非线性复合放大光纤环形镜的非线性传输特性进行了分析。利用非线性放大复合环形镜和半导体饱和吸收体构成复合腔被动锁模掺铒光纤激光器,获得了稳定的锁模脉冲输出,得到了重复频率为 248 MHz 的谐频锁模脉冲输出。

\* 国家自然科学基金、国家教委博士点基金资助项目。

## 2 非线性放大复合环形镜

图 1 为非线性放大复合环形镜(NACLIM)的结构示意图。NACLIM 由两个光纤耦合器构成。分别将耦合器 A 和 B 的两个端口连接起来组成两个臂,其中臂  $b-1$  中放置一个光纤放大器,而臂  $d-2$  中焊接有一定长度的单模光纤(SMF);耦合器 B 的另外两个端口 3 和 4 连接成一个光纤环;耦合器 A 的两个端口  $a$  和  $c$  是 NACLIM 的输入、输出端口。当有光从端口  $a$  输入时,经 NACLIM 传输后,在端口  $a$  中将会有反射光输出,而在端口  $c$  中输出透射光。由于光纤的非线性 Kerr 效应,如果 NACLIM 中传输光场的光强足够大,传输光场积累的非线性相移将使 NACLIM 产生非线性反射和透射。下面我们将采用传输矩阵的方法分析 NACLIM 的非线性传输特性。

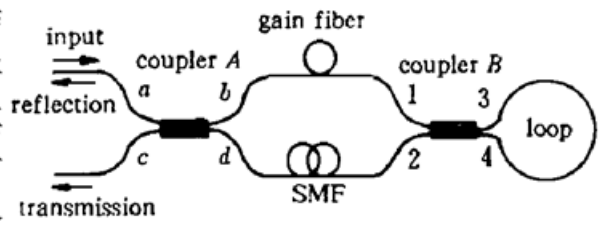


图 1 非线性放大复合环形镜结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a nonlinear amplifying compound loop mirror (NACLIM)

当有光从耦合器 A 的两个端口  $a$  和  $c$  中入射时,经过耦合器 A 后在端口  $b$  和  $d$  获得的光电场为

$$\begin{bmatrix} E_b \\ E_d \end{bmatrix} = K_A \begin{bmatrix} E_a \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \alpha_A} & i\sqrt{\alpha_A} \\ i\sqrt{\alpha_A} & \sqrt{1 - \alpha_A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_a \\ E_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$K_A$  为耦合器 A 的传输矩阵,  $\alpha_A$  为耦合器 A 的耦合系数。

忽略臂  $d-2$  中单模光纤的传输损耗,那么光场经过臂  $b-1$  和  $d-2$  后得到的  $E_1$  和  $E_2$  可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} E_b \\ E_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{G_1} \exp(i\mathcal{Q}) & 0 \\ 0 & \exp(i\mathcal{Q}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_b \\ E_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $\mathcal{Q}$  和  $\mathcal{Q}$  是非线性相移

$$\mathcal{Q} = \frac{2\pi n_2 L_{\text{GAIN}} G_1 |E_b|^2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (3a)$$

$$\mathcal{Q} = \frac{2\pi n_2 L_{\text{SMF}} |E_d|^2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (3b)$$

其中  $n_2$  为光纤的非线性折射率,  $\lambda$  为工作波长,  $A_{\text{eff}}$  为有效模场面积,  $L_{\text{GAIN}}$  为增益光纤的长度,  $L_{\text{SMF}}$  为单模光纤的长度,  $G_1$  为增益光纤的增益。

$E_1$  和  $E_2$  经过耦合器 B 后的光场为  $E_3$  和  $E_4$

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = K_B \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \alpha_B} & i\sqrt{\alpha_B} \\ i\sqrt{\alpha_B} & \sqrt{1 - \alpha_B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中的  $K_B$  为耦合器 B 的传输矩阵,  $\alpha_B$  为耦合系数。

$E_3$  和  $E_4$  经过光纤环传输返回耦合器 B 后得到  $E_3'$  和  $E_4'$ , 上标表示返回的光场, 返回到端口 3 的光场是  $E_3'$ ,  $E_4'$  返回端口 4,

$$\begin{bmatrix} E_3' \\ E_4' \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(i\mathcal{Q}) & 0 \\ 0 & \exp(i\mathcal{Q}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$\mathcal{Q}_3 = \frac{2\pi n_2 L_{\text{LOOP}} |E_4|^2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (6a)$$

$$\mathcal{Q}_4 = \frac{2\pi n_2 L_{\text{LOOP}} |E_3|^2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (6b)$$

$L_{\text{LOOP}}$  为光纤环的长度。由于经过光纤环传输以后,  $E_3$  将到达耦合器  $B$  的端口 4, 而  $E_4$  到达端口 3, 为了反映这种变换在 (5) 式中引入一个变换矩阵  $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ , 需要注意的是  $\mathcal{Q}_3$  随  $E_4$  变化, 而  $\mathcal{Q}_4$  随  $E_3$  变化。

$E_3'$  和  $E_4'$  经过耦合器  $B$  后重新进入增益臂  $b-1$  和单模光纤臂  $d-2$ , 得到  $E_1'$  和  $E_2'$ ,

$$\begin{bmatrix} E_1' \\ E_2' \end{bmatrix} = K_B \begin{bmatrix} E_3' \\ E_4' \end{bmatrix} \quad (7)$$

光场从增益光纤和单模光纤中经过以后, 返回到耦合器  $A$ , 有

$$\begin{bmatrix} E_b' \\ E_d' \end{bmatrix} = M_3 \begin{bmatrix} E_1' \\ E_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{G_2} \exp(i\mathcal{Q}_3) & 0 \\ 0 & \exp(i\mathcal{Q}_4) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1' \\ E_2' \end{bmatrix} \quad (8)$$

$G_2$  为光场从光纤环返回后, 再次经历掺铒光纤时所获得的增益, 上式中

$$\mathcal{Q}_3 = \frac{2\pi n_2 L_{\text{GAIN}} G_2 |E_1'|^2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (9a)$$

$$\mathcal{Q}_4 = \frac{2\pi n_2 L_{\text{SMF}} |E_2'|^2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (9b)$$

$E_b'$  和  $E_d'$  经耦合器  $A$  变换后得到反射光场  $E_a'$  和透射光场  $E_c'$ ,

$$\begin{bmatrix} E_a' \\ E_c' \end{bmatrix} = K_A \begin{bmatrix} E_b' \\ E_d' \end{bmatrix} \quad (10)$$

结合 (1) 到 (10) 式, 将每一个传输矩阵相乘可以得到入射光场和出射光场的关系式

$$\begin{bmatrix} E_a' \\ E_c' \end{bmatrix} = K_A \cdot M_3 \cdot K_B \cdot M_2 \cdot K_B \cdot M_1 \cdot K_A \cdot \begin{bmatrix} E_a \\ E_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

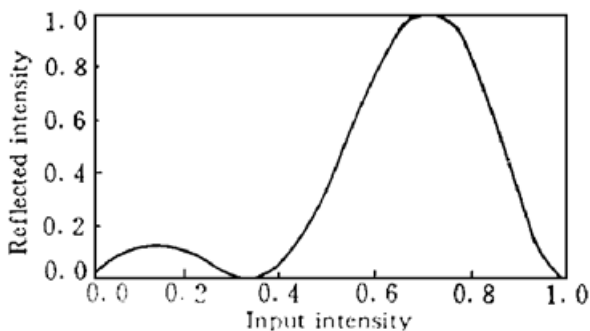


图 2  $\alpha_a = 0.1, \alpha_b = 0.1$ , 小信号增益 = 20 dB,  $L_{\text{GAIN}} = 1$  m,  $L_{\text{LOOP}} = 0.5$  m,  $L_{\text{SMF}} = 100$  m 时, 非线性复合放大环形镜的反射特性

Fig. 2 Reflection characteristics of NACL M with  $\alpha_a = 0.1$ , and  $\alpha_b = 0.1$ , small signal gain = 20 dB,  $L_{\text{GAIN}} = 1$  m,  $L_{\text{LOOP}} = 0.5$  m, and  $L_{\text{SMF}} = 100$  m

由于上式中每个矩阵中的相移项都随传输光场变化, 求得的 (11) 式的解析表达式将很复杂。因此, 下面将采用数值计算的方法对 (11) 式进行分析。

为简化起见, 假设 NACL M 仅在端口  $a$  有光入射并且不考虑掺铒光纤增益饱和, 这样有  $G_1 = G_2$ 。当光强不断变化的连续光入射时, 计算得到 NACL M 的非线性反射特性如图 2 所示。可以发现随着入射光强的增大, 反射光强也将逐渐增大; 但当入射光强大于 NACL M 的第一个反射峰所对应的入射光强时, 反射光将随着入射光强的增大而逐渐减小, 直至等于零。这和 NOLM 以及 NALM 的非线性传输特性相同<sup>[3]</sup>。当光脉冲入射 NACL M 时, 如果脉冲的峰值光强小于图 2 中第一个反射峰对应的光强, 那么脉冲的峰值将比脉冲的两翼反射充分, 归一化的

反射脉冲将得到压缩; 如果入射光脉冲的峰值功率大于图 2 中第一个反射峰对应的光强, 反射光脉冲将展宽, 并且脉冲峰产生分裂, 形成多峰结构。假设归一化入射光脉冲为高斯型

$$E_{in}(\tau) = \exp\left[-\frac{\tau^2}{\tau_0^2}\right] \quad (12)$$

图 3 给出了入射高斯脉冲和反射脉冲的曲线。由图可以很明显地看出反射脉冲发生分裂并且出现了多峰结构。这与图 2 的分析结果也是一致的。

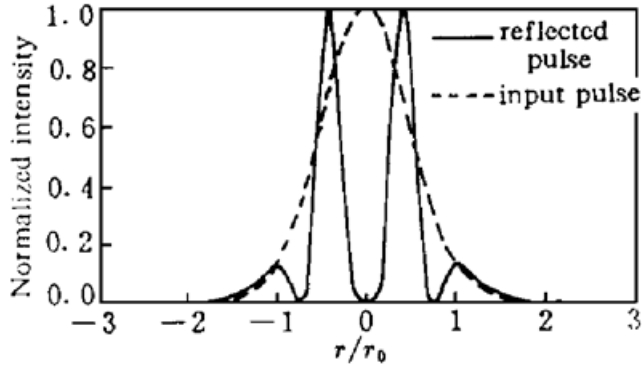


图 3  $\alpha_A = 0.1, \alpha_B = 0.1$ , 小信号增益 = 20 dB,  $L_{GAIN} = 1$  m,  $L_{LOOP} = 0.5$  m,  $L_{SMF} = 100$  m 时, 非线性复合放大环形镜的脉冲反射特性  
Fig. 3 Pulse reflection characteristics of NA CLM with  $\alpha_A = 0.1$ , and  $\alpha_B = 0.1$ , small signal gain = 20 dB,  $L_{GAIN} = 1$  m,  $L_{LOOP} = 0.5$  m, and  $L_{SMF} = 100$  m

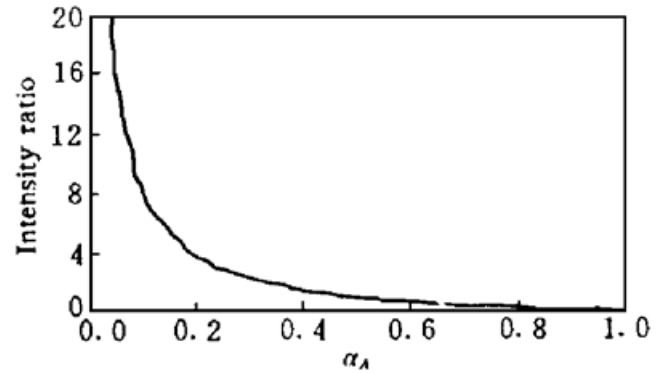


图 4  $\alpha_B = 0.1$ , 小信号增益 = 20 dB,  $L_{GAIN} = 1$  m,  $L_{LOOP} = 0.5$  m,  $L_{SMF} = 100$  m 时, 非线性复合放大环形镜的反射光强与透射光强之比随  $\alpha_A$  的变化曲线  
Fig. 4 Ratio of reflected intensity to transmitted intensity as a function of  $\alpha_A$  with  $\alpha_B = 0.1$ , small signal gain = 20 dB,  $L_{GAIN} = 1$  m,  $L_{LOOP} = 0.5$  m, and  $L_{SMF} = 100$  m

图 4 为脉冲入射时, 反射脉冲的峰值光强和透射脉冲的峰值光强的比值随耦合器 A 的耦合系数  $\alpha_A$  的变化曲线。可以发现, 随着  $\alpha_A$  的增大, 峰值光强比将逐渐减小, 即反射光脉冲将逐渐减弱, 透射光脉冲将逐渐增强。计算表明, 以上特性仅取决于  $\alpha_A$ , 不随  $\alpha_B$  的变化而变化, 并且增益光纤的增益变化对以上特性也没有影响。这表明, 通过改变耦合器 A 的耦合系数, 可以调节 NA CLM 的非线性光脉冲反射和透射特性, 从而获得所需要的反射和透射峰值光强比。与 NA LM 不同的是, 当  $\alpha_A = 0.5$  时, NA CLM 的反射光脉冲和透射光脉冲的峰值光强相等; 而在 NA LM 中,  $\alpha_A = 0.5$  时, 入射光脉冲将全部成为透射光脉冲, 没有光脉冲反射。计算表明, 以上特性对于连续光入射 NA CLM 的情况同样适用。

当掺铒光纤和光纤环的长度不是很长时, 入射光经历的非线性相移将取决于入射光在单模光纤臂  $d-2$  所获得的相移。众所周知, 当光纤环中的非线性相移可以忽略时, 光纤环端口 2 处的透射光强与端口 1 处的入射光强有以下关系式<sup>[10]</sup>

$$I_{trans,2} = (1 - 2\alpha_B)^2 I_{in,1} \quad (13)$$

当  $\alpha_B = 0.5$  时,  $I_{trans}$  等于零, 将没有透射光进入单模光纤臂  $d-2$ 。为了在单模光纤臂  $d-2$  中获得足够大的非线性相移, 要求端口 4 的透射光强足够大, 这就使得  $\alpha_B$  不能等于 0.5, 并且  $\alpha_B$  越接近 0 或 1, 在端口 2 获得的透射光强越大。图 5 为光纤环长度仅为 0.5 m, 单模光纤臂长度为 100 m, 光纤环的非线性相移很小,  $\alpha_B$  取不同的值时, NA CLM 的反射光脉冲曲线。当耦合器 B 的耦合系数为  $1 - \alpha_B$  时, NA CLM 的反射光脉冲与耦合器 B 的耦合系数为  $\alpha_B$  时的反射脉冲相

同; 如果  $\alpha_B = 0.5$ , 归一化的反射光脉冲与入射光脉冲相同。

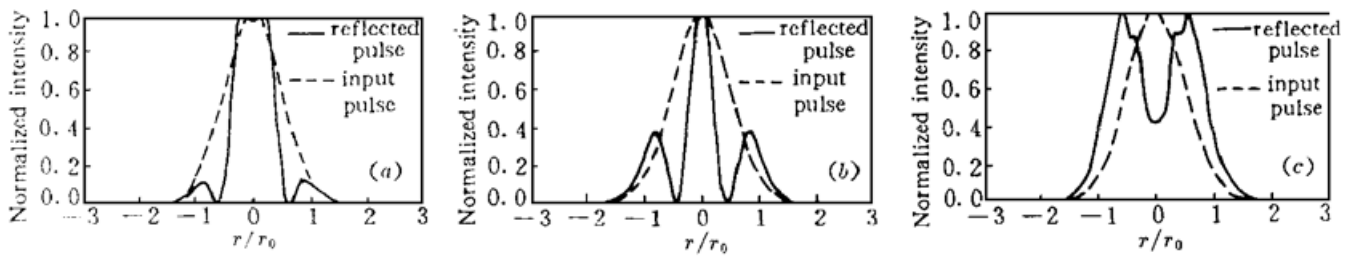


图5  $\alpha_A = 0.1$ , 小信号增益= 20 dB,  $L_{GAIN} = 1$  m,  $L_{LOOP} = 0.5$  m,  $L_{SMF} = 100$  m 时,  $\alpha_B$  分别取不同的值时, 非线性复合放大环形镜的脉冲反射特性

Fig. 5 Pulse reflection characteristics of NA CLM with  $\alpha_A = 0.1$ , small signal gain= 20 dB,  $L_{GAIN} = 1$  m,  $L_{LOOP} = 0.5$  m, and  $L_{SMF} = 100$  m. (a)  $\alpha_B = 0.2$ ; (b)  $\alpha_B = 0.3$ ; (c)  $\alpha_B = 0.4$

### 3 实验研究

利用 NA CLM 构成的被动锁模掺铒光纤激光器的实验结构如图 6 所示。NA CLM 由一个波分复用器和一个 80/20 的光纤耦合器组成, 光纤环中含有 1.1 km 单模光纤, 一个偏振控制

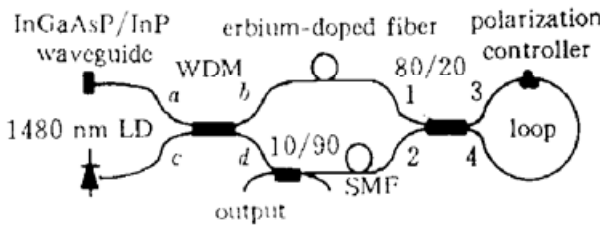


图 6 掺铒光纤激光器结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the erbium-doped fiber laser

器绕在光纤环中用来调节传输光场的偏振态。掺铒光纤长约 10 m, 用一个 1480 nm 的半导体激光器泵浦, 最大泵浦功率约为 35 mW。在 WDM 的端口 c 耦合有一个 InGaAsP/InP 半导体饱和吸收体, 用来实现被动锁模的自启动和稳定锁模脉冲<sup>[11]</sup>, 半导体饱和吸收体的后端面镀有高反射膜, 构成激光器谐振腔的一个反射镜。计算 WDM 和光纤耦合器的尾纤在内, 由掺铒光纤、半导体饱和吸收体和光纤环构成的激光器的主腔的长度为 1.14 km。当激光器的泵浦功率为 15 mW 左右时, 略微调节光纤环的偏振控制器, 激光器实现自启动, 输出十分稳定的被动锁模脉冲, 脉冲的重复率约为 175 kHz,

等于激光器主腔的基频(175.4 kHz)。输出脉冲序列如图 7 (a) 所示, 图 7 (b) 是对应的输出光谱; 由光谱可以知道激光器的中心振荡波长为 1556 nm, 频谱宽度为 2.4 nm。这表明, 500 m 长单模光纤臂的引入并不影响整个激光器的基频, 整个激光器的基频取决于由掺铒光纤和光纤

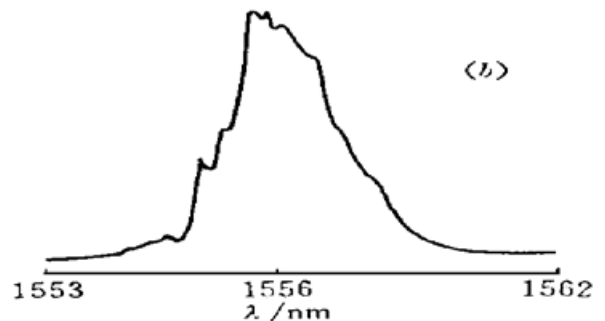
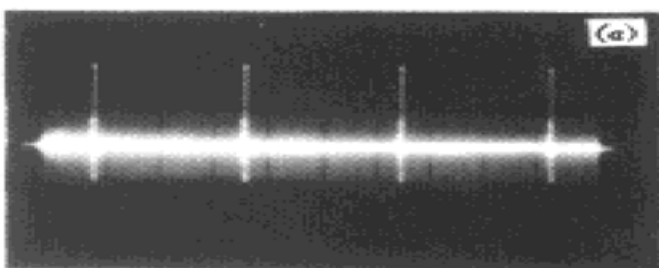


图 7 (a) 被动锁模脉冲; (b) 输出脉冲频谱

Fig. 7 (a) Passively mode locked pulse train; (b) Frequency spectrum of the output pulse

等于激光器主腔的基频(175.4 kHz)。输出脉冲序列如图 7 (a) 所示, 图 7 (b) 是对应的输出光谱; 由光谱可以知道激光器的中心振荡波长为 1556 nm, 频谱宽度为 2.4 nm。这表明, 500 m 长单模光纤臂的引入并不影响整个激光器的基频, 整个激光器的基频取决于由掺铒光纤和光纤

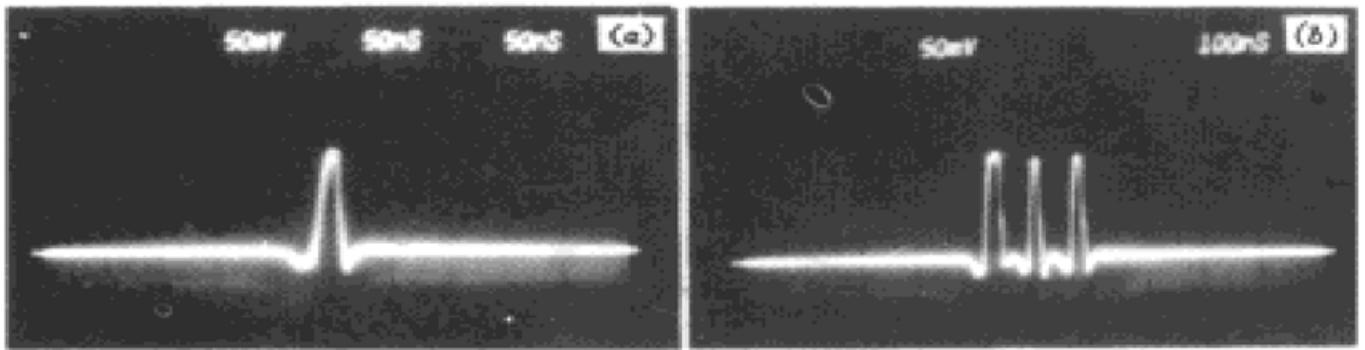


图 8 (a) 单个脉冲输出; (b) 分裂和展宽的脉冲输出

Fig. 8 (a) Single pulse output; (b) Split and broadened pulses

环构成的主腔的长度。图 8 (a) 是单个锁模脉冲的输出波形; 在同样泵浦功率下, 调节光纤环中的偏振控制器, 改变进入单模光纤臂的光场的光强, 在输出端得到脉冲峰发生分裂、脉冲宽度展宽的锁模脉冲如图 8(b) 所示。这一点可以解释为, 与改变耦合器的耦合系数的作用一样, 调节偏振控制器改变了光纤环中光纤的双折射态, 使得光纤环的光强透过率发生改变<sup>[2]</sup>, 从而改变了进入单模光纤臂的光场的光强, 使得激光场在单模光纤臂中经历的非线性相移发生改变, 从而改变了 NACL M 的反射特性, 使得在激光器中振荡的光脉冲产生分裂和展宽。增大激光器的泵浦功率至 25 mW, 调节偏振控制器, 得到如图 9 所示的重复率为 248 MHz 的谐频锁模脉冲输出(由于探测器的响应速率有限, 目前还不能对锁模脉冲的脉冲宽度进行精确测量)。

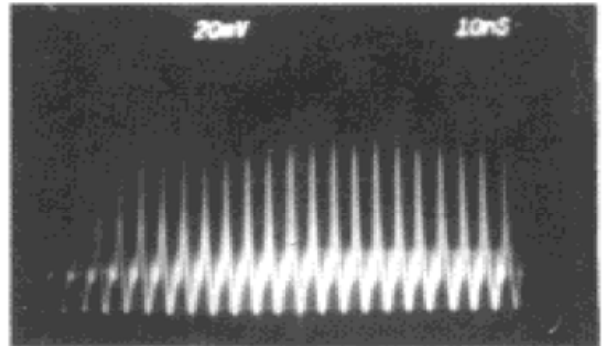


图 9 重复频率为 248 MHz 的被动锁模脉冲

Fig. 9 Passively mode-locked pulses of repetition rate of 248 MHz

由以上实验结果可知, 在图 6 所示的激光器结构中, 如果减小掺铒光纤和光纤环的长度, 即减小掺铒光纤激光器主腔的长度, 提高激光器的基频, 同时选用适当长度的单模光纤臂提供非线性相移, 结合谐频锁模, 有可能获得重复率非常高的稳定被动锁模脉冲。

## 4 结 论

对一种具有复合环结构的非线性放大环形镜进行研究表明, 改变构成非线性放大复合环形镜的光纤耦合器的耦合系数可以控制非线性放大复合环形镜的非线性传输特性, 根据设计需要得到不同的非线性反射和透射率。利用非线性放大复合环形镜, 在掺铒光纤激光器中实现了稳定的被动锁模, 获得脉冲重复频率为 248 MHz 的谐频锁模脉冲输出。实验结果表明, 采用非线性放大复合环形镜构成光纤激光器, 结合谐频锁模, 有可能获得重复频率很高的被动锁模脉冲输出。

## 参 考 文 献

- 1 N. J. Doran, D. Wood. Nonlinear-optical loop mirror. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 56~ 58
- 2 D. B. Mortimore. Fiber loop reflectors. *J. Lightwave Tech.*, 1988, **6**(7): 1217~ 1224

- 3 I. N. Duling III, C.-J. Chen, P. K. A. Wai *et al.*. Operation of a nonlinear loop mirror. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(1): 194~ 199
- 4 M. E. Fermann, F. Haberli, M. Hofer *et al.*. Nonlinear amplifying loop mirror. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(13): 752~ 754
- 5 K. J. Blow, N. J. Doran, B. P. Nelson. Demonstration of the nonlinear fiber loop mirror as an ultrafast all-optical demultiplexer. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(14): 962~ 964
- 6 M. Jinno, T. Matsumoto. Ultrafast all-optical logic operations in a nonlinear Sagnac interferometer with two control beams. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4): 220~ 222
- 7 K. Smith, N. J. Doran, P. G. J. Wigley. Pulse shaping, compression, and pedestal suppression employing a nonlinear-optical loop mirror. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(22): 1294~ 1296
- 8 I. N. Duling III. Subpicosecond all-fibre erbium laser. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(7): 544~ 545
- 9 D. J. Richardson, R. I. Laming, D. N. Payne *et al.*. 320 fs soliton generation with passively mode-locked erbium fibre laser. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(9): 730~ 732
- 10 E. Yoshida, Y. Kimura, M. Nakazawa. Femtosecond erbium-doped fiber lasers and a soliton compression technique. *Japan J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(8): 3461~ 3466
- 11 S. Gray, A. B. Grudinin. Soliton fiber laser with a hybrid saturable absorber. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 207~ 209

## Study on Nonlinear Amplifying Compound Loop Mirror and Passively Mode Locked Erbium-doped Fiber Laser

Huang Zhijian Sun Junqiang Huang Dexiu

(*Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

**Abstract** A nonlinear amplifying compound loop mirror (NACLM) constructed by two fiber couplers is presented and analyzed. The analysis shows that the nonlinear reflection characteristics of the NACLM can be adjusted by changing the splitting ratio of the optical fiber couplers. Using the NACLM and a bulk semiconductor saturable absorber, stable passive mode locking in an erbium-doped fiber laser can be obtained. Passively mode-locked pulses of a repetition rate of 248 MHz has been achieved. It is suggested that using a NACLM as a passive mode locking element, generation of ultrashort pulses of very high repetition rate is promising with a fiber laser.

**Key words** nonlinear amplifying compound loop mirror, passive mode locking, erbium-doped fiber laser