

自启动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)

摘 要 在非线性光纤环形镜非线性开关效应和块状半导体波导饱和吸收效应的共同作用下, 实现了掺铒光纤激光器的自启动被动锁模, 获得了十分稳定的锁模脉冲序列, 观察到高次谐波锁模脉冲输出。分析了非线性光纤环形镜的非线性开关反射特性。

关键词 非线性光纤环形镜, 掺铒光纤激光器, 自启动被动锁模。

1 引 言

被动锁模掺铒光纤激光器结构简单、可以直接产生变换极限超短光脉冲, 是未来超高速、长距离光纤通信系统中的理想光脉冲源。目前主要有两种方法实现掺铒光纤激光器的被动锁模, 一是在激光器谐振腔中引入非线性光纤环形镜(NOLM)^[1]和非线性放大光纤环形镜^[2], 利用光纤的克尔(Kerr)非线性效应形成快速开关效应实现掺铒光纤激光器的被动锁模, 采用这种方法可以获得稳定的单个超短脉冲输出, 但是输出脉冲序列的重复周期不稳定^[3], 并且须对光纤谐振腔进行精确的偏振控制才能实现被动锁模的自启动^[4]; 二是利用半导体材料, 尤其是多量子阱(MQW)材料作为饱和吸收体^[5], 实现掺铒光纤激光器的被动锁模, 这种方法最大的优点是很容易实现激光器的自启动锁模, 输出脉冲的重复频率很稳定, 但是较难获得变换极限光脉冲, 并且多量子阱饱和吸收体的制作较复杂。

在以前的研究中, 作者曾采用半导体波导作为慢速饱和吸收体实现了掺铒光纤激光器的自调 Q ^[6]。在此研究基础上, 本文提出采用块状体结构的半导体波导作为慢速饱和吸收体在掺铒光纤激光器实现锁模的自启动, 同时利用非线性光纤环形镜的非线性快速开关效应对脉冲进行压缩。基于以上设想, 采用半导体激光器泵浦, 实现了掺铒光纤激光器的自启动被动锁模, 得到了十分稳定的被动锁模脉冲输出。对非线性光纤环形镜的非线性反射开关特性进行了分析, 实验现象与分析结果相吻合。

2 非线性光纤环形镜的反射特性

非线性光纤环形镜结构如图 1 所示。由附录(A5)式可知, 当光纤环仅端口 1 有光矢量入射时, 在光纤环形镜的入射端口 1 处得到的反射光矢量 E_1^r 为:

* 国家自然科学基金、国家教委博士点基金资助项目。

收稿日期: 1997-04-05; 收到修改稿日期: 1997-07-08

$$E'_1 = jk^{1/2}(1 - k)^{1/2}[FJ_C + J_A F]E_1 \quad (1)$$

其中 E_1 为入射光矢量, J_C 和 J_A 分别为顺时针和逆时针方向传输光场所经历的双折射琼斯矩阵, k 为耦合器的耦合系数, F 为一个坐标变换矩阵。由(1)式可以认为 E'_1 为两个光矢量 $FJ_C E_1$ 和 $J_A F E_1$ 的相干迭加。忽略光纤的传输损耗, 同时假设光纤中不存在偏振相关的损耗, 则可以用么正矩阵 L 表示光纤的传输矩阵 $J_C^{[7]}$:

$$J_C = \exp(i\phi) L = \exp(i\phi) \begin{bmatrix} A & -B^* \\ B & A \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中的* 表示复共扼, ϕ 为光纤环中顺时针方向传输的光矢量所经历的相移; 对单模光纤有 $|A|^2 + |B|^2 = 1$, 表示能量反射率与入射光的偏振态无关^[7]。考虑到光纤环中不存在法拉第(Faraday)旋转器等非互易光学元件, 则有

$$J_A = \exp(i\phi_A) L^T \quad (3)$$

式中的 ϕ_A 为光纤环中逆时针方向传输的光矢量所经历的相移, T 表示矩阵的转置。由于干涉原理, 结合以上各式可以得到端口 1 处的能量反射率 R 为:

$$R = 2k(1 - k)[1 + r \cos(\phi_r - \phi_0)] \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} r &= \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, & \phi_r &= \phi_c - \phi_A, & \phi_0 &= \arctan(\beta/\alpha) \\ \alpha &= \text{Re}\{|A|^2 + (B^*)^2\}, & \beta &= -\text{Im}\{|A|^2 + (B^*)^2\}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中的 ϕ_r 为非线性相位差; 定义 r 为光学比例因子, ϕ_0 为相位偏置, 由(4)式可以看出 r 和 ϕ_0 均与光纤环中的双折射有关, 光纤双折射的变化对非线性光纤环形镜能量反射率会产生很大的影响。在光纤环中直接用光纤绕制两个 $\lambda/4$ 和一个 $\lambda/2$ 波片组成偏振控制器, 对偏振控制器进行调节, 可以在光纤环中获得任意的双折射^[8], 从而可以在某一个入射光能量下调节 r 和 ϕ_0 , 改变非线性光纤环形镜的能量反射率 R 。

图 2 为在 $0 \leq r \leq 1$ 的范围中对(4)式计算所得到的结果, 在计算中取 $\phi_0 = \phi_r - \phi_0$ 。由图

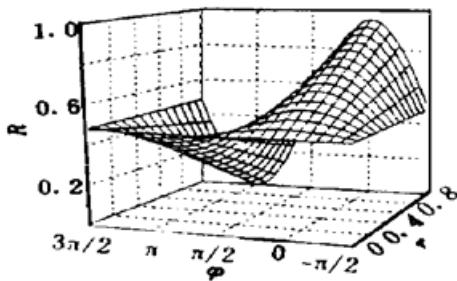


Fig. 2 Surface of energy reflectivity R as function of optical scale factor r and phase difference $\phi = \phi_r - \phi_0$ with $k = 0.4$

2 可以看出, 当 $r = 0$ 时, 非线性光纤环形镜的能量反射率为一个常数, 非线性光纤环形镜的非线性开关作用消失。在 $r \neq 0$ 的情况下, R 在 $\phi_r = \phi_0 + 2m\pi$ 时(m 为整数) 达到极大值, 如果入射光脉冲的峰值经历的 ϕ_r 等于 $\phi_0 + 2m\pi$, 则该脉冲的峰值处将获得最大程度的反射, 而脉冲的两翼将受到不同程度的衰减, 反射光脉冲得到压缩。而在 $\phi_r = \phi_0 + (2m + 1)\pi$ 时, R 达到极小值, 如果此时光脉冲的峰值所经历的 ϕ_r 正好满足这一条件, 反射的光脉冲将展宽, 脉冲发生分裂。通常情况下, 调节偏振控制器可以保证 $r \neq 0$, 从而使非线性光纤环形镜具有非线性开关作用。由文献[9]可知, 利用非线性光纤环

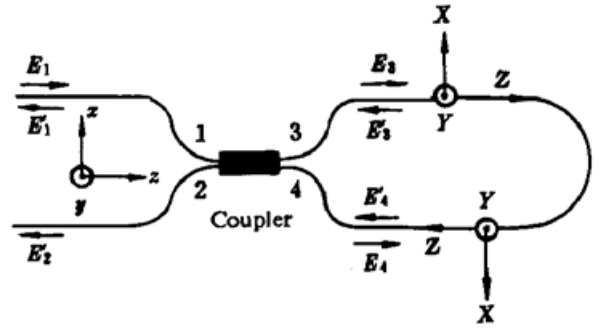


Fig. 1 Schematic diagram of nonlinear optical loop mirror

镜作为等效快速饱和吸收体实现激光器的锁模时, 光纤中的非线性偏振旋转作用不明显, 非线性光纤环形镜的非线性开关作用主要取决于光纤中的自相位调制(SPM), 则 ϕ_r 可以表示为:

$$\phi_{nr} = (1 - 2k) 2\pi n_2 L |E|^2 / \lambda \tag{6}$$

式中的 n_2 为光纤的非线性折射率, λ 为光波长, L 为光纤环的长度, E 为入射光矢量。则反射光能量为:

$$|E_r|^2 = |E_i|^2 2k(1 - k) \{1 + r \cos [(1 - 2k) 2\pi n_2 L |E_i|^2 / \lambda - \phi]\} \tag{7}$$

如果结合(4)式对(7)式进行分析, 结果将十分复杂, 为简化问题单独对(7)式进行数值分析, 计算中 r 和 $n_2 L / \lambda$ 均取为 1, 这样可以得到反射光能量随入射光能量和相位偏置变化的曲面如图 3(a) 所示, 为更清晰地说明问题同时给出 $\phi = 0$ 和 $\phi = \pi$ 时反射光能量随入射光能

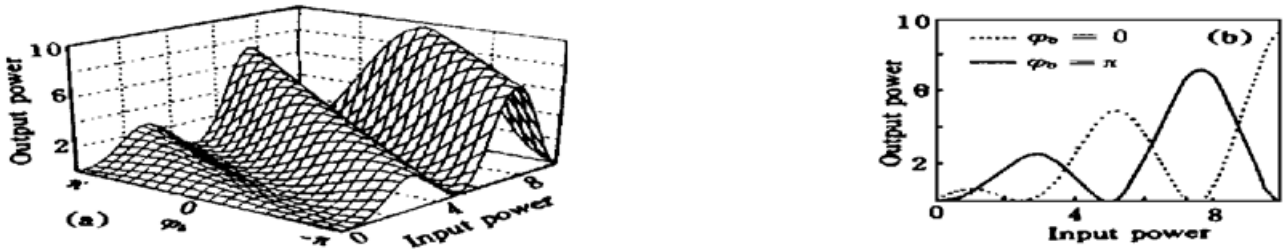


Fig. 3 (a) Surface of reflected energy as function of input energy and phase bias with $k = 0.4$, (b) Plots of reflected energy as function of input energy with $\phi = 0$ and $\phi = \pi$ with $k = 0.4$

量的变化曲线如图 3(b) 所示。由图 3 可以看出, 当具有一定峰值能量的光脉冲入射非线性光纤环形镜时, 必须适当地调整非线性光纤环形镜中的相位偏置, 以保证入射光脉冲的峰值能量小于或等于非线性光纤环形镜在该相位偏置下的第一个光能量反射峰, 使得入射光脉冲不会因为峰值能量过大产生展宽和分裂。在相位偏置 $\phi = (2m + 1)\pi$ 时, 非线性光纤环形镜的第一个光能量反射峰对应最大的入射光能量, 如果入射光脉冲的峰值能量小于或等于该能量值, 入射光脉冲将得到压缩, 如果保持入射光脉冲的峰值能量不变, 改变非线性光纤环形镜的相位偏置, 由于在其它 ϕ 值下, 非线性光纤环形镜的第一个光能量反射峰所对应的入射光能量都较小, 反射光能量随入射光能量增大到一个较小的值后就开始下降, 此时的反射光脉冲将展宽并且分裂成多峰结构。因此, $\phi = (2m + 1)\pi$ 是最理想的相位偏置, 可以对峰值能量较高的入射光脉冲进行压缩。同时由图 3 还可以看出, 在同一个 ϕ 值下增大入射光能量, 当脉冲的峰值能量大于第一个反射峰所对应的入射能量时, 反射脉冲同样也将展宽, 脉冲产生分裂。需要加以说明的是, 改变光纤长度也会产生以上现象。

3 实验研究

3.1 实验装置

被动锁模掺铒光纤激光器的实验结构如图 4 所示。

半导体波导为一个中心吸收波长为 1460 nm 的块状体结构 InGaAsP/InP 波导, 该波导的前端面镀有增透膜, 后端面镀有高反膜, 形成掺铒光纤激光器的一个反射腔镜。在掺铒光纤激光器中, 半导体波导作为慢速饱和吸收体实现锁模的自启动。为了利用非线性光纤环形镜的非线性开关效应对自启动产生的脉冲进行压缩, 在激光器谐振腔中引入一个非线性光纤环形镜作为激光器的另一个反射腔镜; 非线性光纤环形镜由一

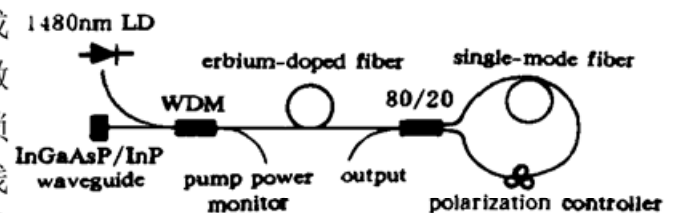
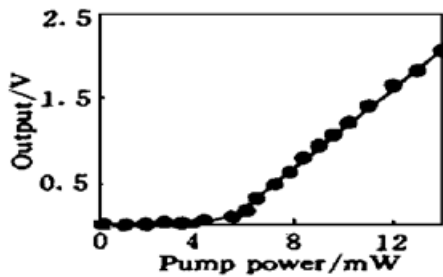


Fig. 4 Experimental setup for a passively mode-locked erbium-doped fiber laser

个分光比为 80/20 的光纤耦合器构成, 光纤环中的单模光纤长度为 1.13 km。在光纤环中绕制有一个光纤偏振控制器, 调节偏振控制器可以为非线性光纤环形镜提供初始相位偏置。掺铒光纤的长为 10 m, 采用中心波长为 1480 nm 的 InGaAsP/InP 半导体激光器泵浦, 最大入纤泵浦功率约为 28 mW。把波分复用器、光纤耦合器和半导体波导的尾纤计算在内, 整个激光器的腔长约为 1.14 km。输出脉冲用模拟示波器监测, 用单色仪记录输出光谱。

3.2 实验结果

掺铒光纤激光器的连续光输出特性如图 5 所示。激光器的阈值泵浦功率约为 5.8 mW。



增大泵浦功率至 15 mW 左右时, 只需略微调节偏振控制器, 为非线性光纤环形镜提供相位偏置并使光学比例因子不等于零, 这样在半导体波导饱和吸收效应的作用下, 掺铒光纤激光器就能实现自启动, 输出十分稳定的锁模脉冲。图 6(a) 为此时输出脉冲的波形, 脉冲序列的重复周期为 175 kHz, 与激光器的基频相一致 ($f_c = c/nL = 175.4$ kHz), 对应输出的光谱如图 6(b) 所示, 中心波长为 1556 nm, 谱宽约为 2.4 nm, 不考虑变换极限因素, 按 $\Delta\nu\Delta\tau = 1$ 估算脉冲宽度约为 10 ps; 采用工作带宽为 300 MHz、上升时间为 1.6 ns 的 TekP 6713 型光电探测器对锁模脉冲的脉宽进行了测量, 在带宽为 6 GHz 的 Tek-TDS 820 数字示波器上测得基频锁模脉冲的脉宽约 6.3 ns, 由于实验条件的限制, 没能对锁模脉冲宽度进行自相关测量; 此时激光器输出的平均功率为 0.87 mW, 单个基频锁模脉冲的能量约为 5 nJ。图 7(a) 为单个脉冲的输出波形。调节偏振控制器, 改变非线性光纤环形镜的相位偏置, 得到分裂和展宽的脉冲输出如图 7(b) 所示, 与前面的分析相一致。实验过程中, 脉冲序列输出十分稳定, 对工作平台施加扰动, 输出脉冲也不消失, 在实验中, 从开机到关机, 激光器稳定锁模的时间长达几小时。

Fig. 5 CW operation characteristics of erbium-doped fiber laser

型光电探测器对锁模脉冲的脉宽进行了测量, 在带宽为 6 GHz 的 Tek-TDS 820 数字示波器上测得基频锁模脉冲的脉宽约 6.3 ns, 由于实验条件的限制, 没能对锁模脉冲宽度进行自相关测量; 此时激光器输出的平均功率为 0.87 mW, 单个基频锁模脉冲的能量约为 5 nJ。图 7(a) 为单个脉冲的输出波形。调节偏振控制器, 改变非线性光纤环形镜的相位偏置, 得到分裂和展宽的脉冲输出如图 7(b) 所示, 与前面的分析相一致。实验过程中, 脉冲序列输出十分稳定, 对工作平台施加扰动, 输出脉冲也不消失, 在实验中, 从开机到关机, 激光器稳定锁模的时间长达几小时。

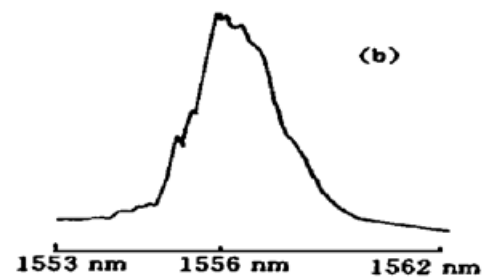
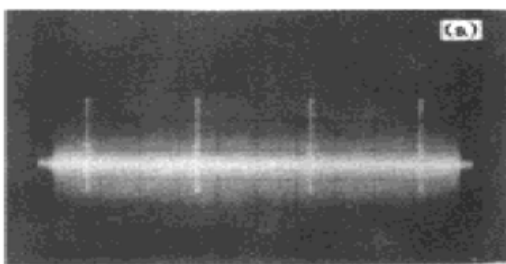


Fig. 6 (a) Mode-locked pulse train output of erbium-doped fiber laser, 2 μ s/div, (b) Spectrum of mode-locked pulse train

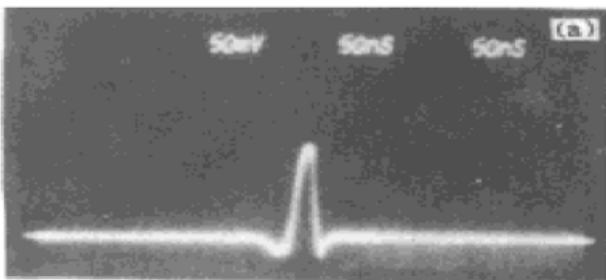


Fig. 7 (a) Single mode-locked pulse output of erbium-doped fiber laser, 50 ns/div, (b) Split mode-locked pulse output, 50 ns/div

当掺铒光纤激光器实现自启动后,即使降低泵浦功率至 10 mW,激光器仍可维持稳定的锁模工作。泵浦功率低于 10 mW 时,锁模脉冲消失;将泵浦功率再次上升至 15 mW 时,激光器恢复锁模工作。以上表明在激光器中存在泵浦功率回滞现象,这可以解释为当泵浦功率较低时,激光器输出连续光,腔内光功率较小,半导体波导的吸收不能饱和,激光器无法自启动;而当锁模脉冲形成后,即使降低泵浦功率,单脉冲的功率仍然很高,足以维持半导体波导的饱和吸收和非线性光纤环形镜的非线性开关作用。

继续增大激光器的泵浦功率,同样可以观察到十分清晰的脉冲分裂过程,脉冲序列的重复频率也将发生变化,重复频率将大于 175 kHz,但此时脉冲的重复频率不够稳定。泵浦功率增大到 18 mW 左右时,脉冲序列的重复频率稳定在 348 kHz 左右,重复频率大致等于两倍激光器基频,脉冲序列同样可以稳定输出很长时间。继续增大泵浦功率,脉冲序列的重复频率仍将成倍增大,并且以上过程也存在泵浦功率回滞现象。当泵浦功率为 27 mW 时,仔细调节偏振控制器,获得重复频率约为 78 MHz 的谐频锁模脉冲输出如图 8 所示。但谐频锁模脉冲输出不是特别稳定,而且需精确调整偏振控制器,才能自启动谐频锁模。

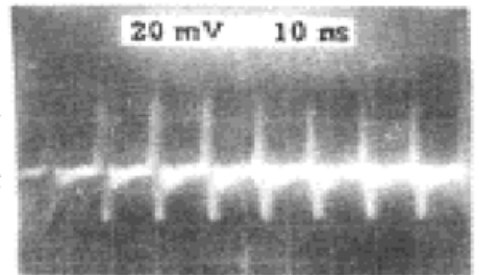


Fig. 8 Harmonically mode-locked pulse train output of erbium-doped fiber laser, 10 ns/div

结 语 本文提出利用块状体结构的半导体波导作为慢速饱和吸收体与非线性光纤环形镜的非线性快速开关效应相结合,实现了掺铒光纤激光器的自启动被动锁模。采用半导体激光器泵浦,得到了十分稳定的自启动被动锁模脉冲输出,观察到了重复频率为 78 MHz 的谐频锁模脉冲。在此研究基础上,将对激光器的参数进行优化,研制工作稳定、脉冲重复频率高的锁模掺铒光纤激光器。

参 考 文 献

- [1] D. J. Doran, D. Wood, Nonlinear-optical loop mirror. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 56~ 58
- [2] M. E. Fermann, F. Habert, M. Hofer *et al.*, Nonlinear amplifying loop mirror. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(10): 752~ 754
- [3] H. A. Haus, E. P. Ippen, K. Tamura, Additive-pulse modelocking in fiber lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(1): 200~ 208
- [4] H. Lin, D. K. Donald, W. V. Sorin, Optimizing polarization states in a figure-8 laser using a nonreciprocal phase shifter. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(7): 1121~ 1128
- [5] B. C. Barnett, L. Raham, M. N. Islam *et al.*, High-power erbium-doped fiber laser mode locked by a semiconductor saturable absorber. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5): 471~ 473
- [6] A. Yu, A. S. Siddiqui, Optical modulators using fiberoptic sagnac interferometers. *IEE Proc Optoelectron.*, 1994, **141**(1): 1~ 7
- [7] T. A. Birks, P. Morkel, Jones calculus analysis of single-mode fiber Sagnac reflector. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(15): 3107~ 3113
- [8] R. McBride, J. D. C. Jones, A passive phase recovery technique for Sagnac interferometer based on controlled loop birefringence. *J. Mod. Optics*, 1992, **39**(6): 1309~ 1320
- [9] A. J. Stentz, R. W. Boyed, Polarization effects and nonlinear switching in fiber figure-eight lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18): 1462~ 1464
- [10] 黄志坚, 孙军强, 黄德修, 自调 Q 掺铒光纤激光器. *高技术通讯*, 1996, **6**(12): 13~ 16

附 录

考虑到在非线性光纤环形镜中存在光纤双折射, 采用琼斯矩阵法分析非线性光纤环形镜的非线性反射特性。通常认为光纤耦合器的耦合系数与偏振无关, 忽略光纤耦合器的插入损耗, 则光纤耦合器的传输矩阵 K 可以表示为:

$$K = \begin{bmatrix} (1-k)^{1/2} & ik^{1/2} \\ ik^{1/2} & (1-k)^{1/2} \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

上式中的 k 为光纤耦合器的功率耦合系数。如图 1 所示, 设光纤环仅端口 1 有光矢量入射, 入射光矢量 E_1 经过光纤耦合器后可以得到:

$$E_3 = (1-k)^{1/2} E_1 \quad (\text{A2a})$$

$$E_4 = jk^{1/2} E_1 \quad (\text{A2b})$$

由于在非线性光纤环形镜中存在相向传输的光矢量, 为便于分析, 引入两种不同的坐标系^[6], 如图 1 所示。 (x, y, z) 为静止的实验坐标系, 用来描述输入、输出光矢量 E ; (X, Y, Z) 为 Z 轴沿光纤长度方向可移动的运动坐标系, 用来描述光纤环中顺时针方向和逆时针方向传输的光矢量所经历的琼斯矩阵 J_C 和 J_A 。为了在同一个坐标系 (x, y, z) 中表示光矢量, 对琼斯传输矩阵引入变换矩阵 F

$$F = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

那么, E_3 和 E_4 经光纤传输后得到的 E'_3 和 E'_4 用矩阵可以表示为:

$$\begin{bmatrix} E'_3 \\ E'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FJ_C & 0 \\ 0 & J_A F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

E'_3 和 E'_4 经过光纤耦合器后在光纤环形镜的入射端口 1 处得到的反射光矢量 E'_1 为:

$$E'_1 = jk^{1/2}(1-k)^{1/2}[FJ_C + J_A F]E_1 \quad (\text{A5})$$

Self-Starting Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Laser

Huang Zhijian Sun Junqiang Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

(Received 5 April 1997; revised 8 July 1997)

Abstract By using the nonlinear switching effect of nonlinear optical fiber loop mirror (NOLM) and the saturable absorption effect of bulk semiconductor waveguide self-starting mode-locking of erbium-doped fiber laser has been demonstrated. High stable mode-locked pulses train has been obtained. Harmonically mode-locked pulses have been observed. The nonlinear switching reflection characteristic of NOLM is analyzed.

Keywords nonlinear optical loop mirror, erbium-doped fiber laser, self-starting mode-locking.