

文章编号: 1001-3806(2009)05-0548-03

被动锁模光纤激光器的多模式输出

张祖兴^{1,2}, 伍剑¹, 徐坤¹, 林金桐¹

(1. 北京邮电大学 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876; 2. 江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330022)

摘要: 被动锁模光纤激光器腔体结构简单, 可以实现全光纤集成, 是产生超短脉冲的有效方法, 而非线性偏振旋转又是其中最重要、最简单的被动锁模方法。为了研究基于非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器存在的多种不同工作模式, 采用实验方法, 得到了包括正常孤子态, 多脉冲束缚态, 噪声像脉冲态等输出模式。结果表明, 基于非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器存在多种不同的工作模式。

关键词: 激光技术; 光纤激光器; 被动锁模; 非线性偏振旋转

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.030

Multiple output states from passive mode-locked fiber lasers

ZHANG Zu-xing^{1,2}, WU Jian¹, XU Kun¹, LIN Jin-tong¹

(1. Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies of Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: It is effective to produce super short pulses from passive mode-locked fiber lasers based on nonlinear polarization rotation due to their simple and compact all-fiber configurations. In order to study the operation states in a passive mode-locked fiber laser, the effect of normal solitons, bound solitons and noise-like pulse state was investigated in experiments. Experiment results show that there are multiple output states from a passive mode-locked fiber laser.

Key words: laser technique; fiber laser; passive mode-locked; nonlinear polarization rotation

引言

被动锁模光纤激光器腔体结构简单, 可以实现全光纤集成, 是产生超短脉冲的一种非常行之有效的方法^[1-3]。实现光纤激光器被动锁模的方法主要包括半导体可饱和吸收体被动锁模、附加脉冲锁模、非线性偏振旋转被动锁模等。其中附加脉冲锁模是利用非线性放大环形镜或非线性光纤环形镜作等效可饱和吸收体。非线性偏振旋转是其中最重要、最简单的被动锁模方法。从概念上理解, 非线性偏振旋转其锁模机制与“8”字形激光器相同, 只是用同一脉冲的两个正交分量代替反向传输的两列波。从实用的角度看, 这种方法可以用一个具有单个光纤环形腔的光纤激光器来实现, 结构非常简单。非线性偏振旋转被动锁模基本原理是: 假设初始脉冲是线偏振态, 通过一个 $\lambda/4$ 波

片后变为椭圆偏振态, 而椭圆偏振光可以认为是强度不同的左旋和右旋圆偏振光两个偏振分量的叠加。这两圆偏振分量在光纤中传输时由于受光纤的非线性效应作用(包括自相位调制和交叉相位调制)会产生大小不同的非线性相移, 从而使脉冲偏振态发生变化, 且整个脉冲的偏振态变化不是均匀的, 脉冲峰值处于偏振态旋转大于两翼处。调节光纤输出端半波片的取向, 使得脉冲中央的高强度部分能透过其后的起偏器, 而两翼的低强度部分被阻止, 这样就形成了等效的可饱和吸收体, 脉冲取得了压缩。

1 非线性偏振旋转效应

由于光纤具有非线性双折射, 椭圆偏振光脉冲经过光纤后, 它的两正交偏振(x 和 y) 光分量会经历不同的相移, 因此, 使得偏振椭圆产生旋转, 而由于这是一个强度相关的过程, 偏振椭圆旋转的量与脉冲的强度有关。为了更好地理解非线性偏振旋转现象, 考虑到自相位调制(self phase modulation, SPM)和交叉相位调制(cross-phase modulation, XPM)的非线性机理, 它们对光场的作用可以分别近似写成:

$$A_x(z + \Delta z, t) = A_x(z, t) \exp[i\gamma |A_x(z, t)|^2 \Delta z] \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60807014); 江西省教育厅科技基金资助项目(GJJ09152)

作者简介: 张祖兴(1975-), 男, 博士, 主要研究方向为光纤激光器及全光信息处理等。

E-mail: stellarzh@hotmail.com

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2009-03-02

$$A_y(z + \Delta z, t) = A_y(z, t) \exp\left[i\gamma \frac{2}{3} |A_y(z, t)|^2 \Delta z\right] \quad (2)$$

总电场写成矢量形式为:

$$\mathbf{E}(z) \approx \begin{bmatrix} A_x(z, \tau) e^{ik_z z} e^{i\Delta k_x z} \\ A_y(z, \tau) e^{ik_z z} e^{i\Delta k_y z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,下标 x, y 分别代表两个正交分量, $\Delta k_i = \frac{2\pi}{\lambda} \gamma \times \left[|A_i(z, \tau)|^2 + \frac{2}{3} |A_j(z, \tau)|^2 \right], i = x, j = y$ 或 $i = y, j = x$ 。这样总电场可以重写为:

$$\mathbf{E}(z, \tau) \approx \begin{bmatrix} E_x(z, \tau) \\ E_y(z, \tau) \end{bmatrix} \approx \text{Re} \left\{ \begin{bmatrix} a_x(z, t) \\ a_y(z, \tau) e^{i(\Delta k_y - \Delta k_x)z} e^{i\varphi} \end{bmatrix} e^{ik_z z} e^{-i\omega\tau} \right\} \quad (4)$$

这里引入了真实场 a_x 和 a_y , φ 是 a_x 和 a_y 的任意初始相位差。这个总电场的偏振态由下面椭圆方程决定:

$$\left[\frac{E_x(z, \tau)}{a_x(z, \tau)} \right]^2 + \left[\frac{E_y(z, \tau)}{a_y(z, \tau)} \right]^2 - 2 \left[\frac{E_x(z, \tau)}{a_x(z, \tau)} \right] \left[\frac{E_y(z, \tau)}{a_y(z, \tau)} \right] \times \cos[(\Delta k_y - \Delta k_x)z + \varphi] = \sin^2[(\Delta k_y - \Delta k_x)z + \varphi] \quad (5)$$

进一步,它的椭圆偏振角可写为:

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \left[\frac{2a_x(z, t)a_y(z, t)}{a_x^2(z, t) - a_y^2(z, t)} \right] \cos[(\Delta k_y - \Delta k_x)z + \varphi] \right\} \quad (6)$$

式中,下标 $i = 1, 2$ 。图1是两个不同观察位置的椭圆偏振图,这里假设了 a_x 和 a_y 相对振荡电场随时间慢变,并且 $\tau_1 \approx \tau_2$, 因此电场振幅不变。偏振椭圆旋转表示了电场的快时间相关性。

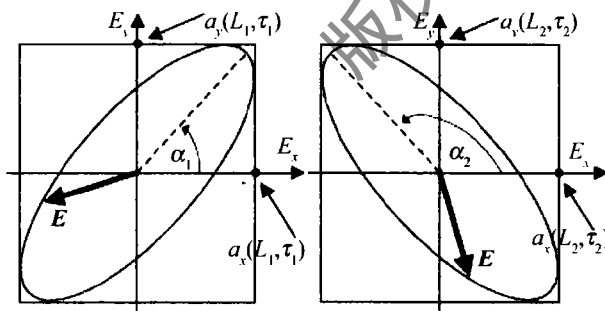


Fig. 1 Polarization diagram of a plane wave and its tilted ellipse at two different observation distances (L_1 and L_2)

由椭圆偏振角表达式可以看出,若考虑低强度光即忽略非线性效应,此时 $\Delta k_x = \Delta k_y = 0$, 则总电场椭圆偏振角 α_i 是固定角,这就是说如果弱光在各向同性光纤中传播椭圆偏振角 α_i 是常数,不会发生偏振旋转。如果引入非线性偏振旋转效应,此时 $\Delta k_x \neq \Delta k_y \neq 0$, 椭圆偏振角 α_i 与传播距离 z 有关,结果偏振椭圆随着在

光纤中传播的距离旋转。

图2形象地描绘了非线性偏振旋转对脉冲的作用效应。如果不考虑非线性效应,让如图2a所示的均匀

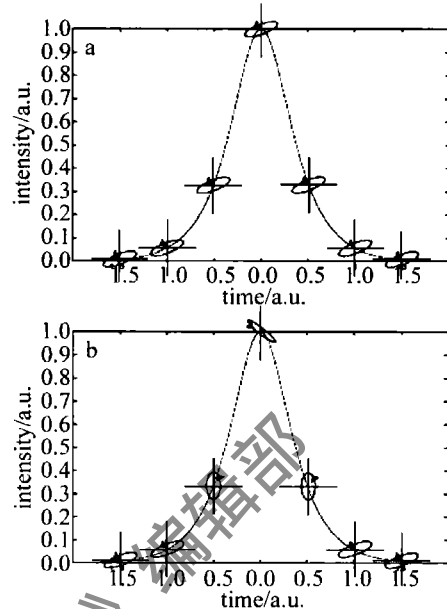


Fig. 2 Visual figure of the physical effect of nonlinear polarization rotation on a pulse

偏振脉冲注入到各向同性光纤,那么输出脉冲依然是如图2a所示的均匀偏振脉冲。如果同样脉冲注入到同样光纤,但考虑到光纤的自相位调制和交叉相位调制非线性效应,输出脉冲见图2b,在强度较低的脉冲两翼偏振椭圆取向几乎不变,而随着强度增大偏振椭圆旋转越来越明显。所以,通常在非线性偏振旋转锁模光纤激光器中存在线性偏振控制器,调节偏振控制器的取向使脉冲通过起偏器后两翼被阻止,而强度高的中间部分通过,这样可以不断压缩脉冲,最后形成稳定的锁模脉冲。

2 多种工作模式

图3是非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器典型结构图。激光腔包括一段长16m、钕离子的离子浓度为 $4.0 \times 10^{-4} / \text{cm}^3$ 的掺钕光纤 (erbium-doped fiber, EDF) 作为增益介质,一个 980/1550 波分复用器

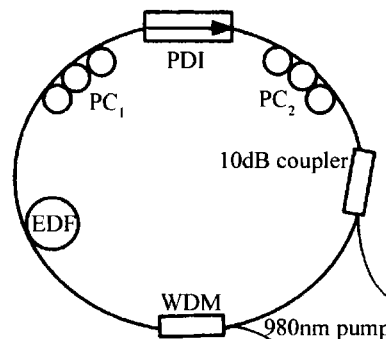


Fig. 3 Configuration of a passive mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization rotation

为 $4.0 \times 10^{-4} / \text{cm}^3$ 的掺钕光纤 (erbium-doped fiber, EDF) 作为增益介质,一个 980/1550 波分复用器

(wavelength-division multiplexer, WDM) 用来把 980nm 抽运激光耦合进掺铒光纤, 一个两端带尾纤的偏振相关隔离器 (polarization-dependent isolator, PDI) 保证激光器单方向工作和同时作为起偏器, 两个偏振控制器 (polarization controller, PC) 用来控制偏振, 用 1 个 10dB 耦合器的 10% 端口输出光信号。整个激光器是全光纤结构, 不含有任何空间开口结构。整个光纤激光器腔长约 23.2m, 相应脉冲绕整个激光腔循环 1 周的周期约是 116ns。腔外另一个 10dB 耦合器用来对输出信号进行分束, 这样可以同时观察输出光脉冲波形和光谱。用于描述非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器的耦合非线性薛定谔方程可写成如下形式^[4-5]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = i\beta u - \delta \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{ik''}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + i\gamma \left(|u|^2 + \frac{2}{3} |v|^2 \right) u + \frac{i\gamma v^2 u^*}{3} + \frac{g}{2} u + \frac{g}{2\Omega_g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -i\beta v + \delta \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{ik''}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + i\gamma \left(|v|^2 + \frac{2}{3} |u|^2 \right) v + \frac{i\gamma u^2 v^*}{3} + \frac{g}{2} v + \frac{g}{2\Omega_g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (8)$$

式中, u 和 v 是分别沿光纤慢轴和快轴的两正交归一化慢变脉冲包络, $2\beta = 2\pi\Delta n/\lambda$ 是两正交模的波数差, $2\delta = 2\beta\lambda/(2\pi c)$ 两正交模群速度差的倒数, k'' 是 2 阶色散参量, γ 是光纤非线性系数, g 是掺铒光纤可饱和增益系数, Ω_g 是增益带宽, 对非掺杂光纤, $g=0$, c 为光速。掺铒光纤增益饱和由下式决定:

$$g = g_0 \exp \left[- \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (|u|^2 + |v|^2) dt}{E_s} \right] \quad (9)$$

式中, g_0 是小信号增益, E_s 是饱和能量。

数值解上述描述被动锁模光纤激光器的耦合非线性薛定谔方程和实验上都已证实; 任意一个被动锁模光纤激光器都存在多种不同的工作模式, 包括正常孤子态、多脉冲束缚态、噪声像脉冲态等, 其中每一种工作模式又存在多种特殊的工作模式。

2.1 正常孤子态

如果抽运功率高于被动锁模光纤激光器自启动的阈值功率 (通常是几十毫瓦), 调节激光腔内的偏振控制器, 可以产生被动锁模脉冲。如果激光腔色散等激光腔参量管理恰当, 产生的锁模脉冲就是孤子脉冲, 但此时激光腔内可能同时存在多个孤子脉冲。如果进一步微调偏振控制器, 使腔内同时存在的多个脉冲等间隔分布, 这就是被动谐波锁模态。图 4 是实验中得到的单脉冲和被动谐波锁模脉冲输出, 单脉冲的重复频率是基腔频 8.61MHz, 被动谐波锁模重复频率为 439MHz 的, 它对应于 51 次谐波锁模。

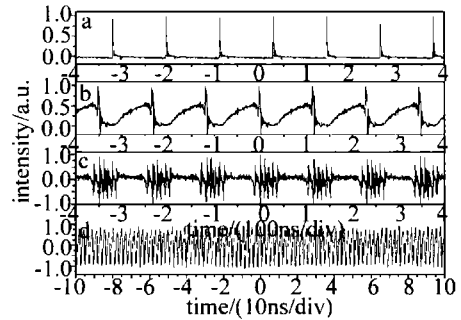


Fig. 4 Single-pulse train and passive harmonic mode-locked pulse

2.2 多脉冲束缚态

1992 年, MALOMED 等人理论上预言了耗散扰动非线性薛定谔方程存在束缚孤子态解^[6-7], AFANASJEV 等人给出了稳定的束缚孤子理论解^[8], 并指出时间上轻微重叠的孤子脉冲能形成有固定间距的脉冲束缚态。TANG 等人在被动锁模光纤激光器中观察到多脉冲束缚态^[9], 并随后进行了详细的研究。在非线形偏振旋转被动锁模光纤激光器中, 偏振控制器调节合适, 可以产生多脉冲束缚态。多个束缚在一起的脉冲作为一个整体, 就好像一个单一的脉冲, 脉冲间距由激光腔参量决定, 对于一个给定的激光器, 脉冲间距是一些离散值, 如图 5 所示。产生多脉冲束缚态是由于脉冲间存在相互作用。

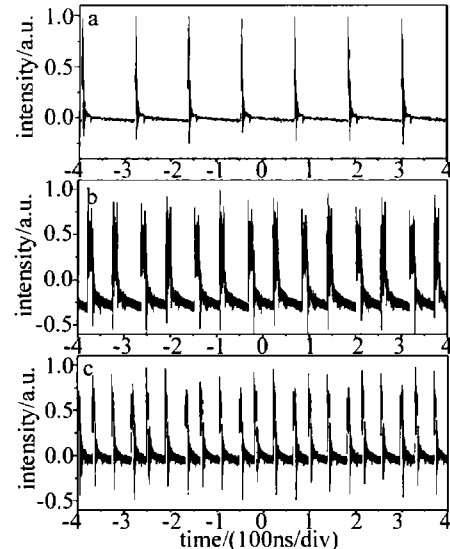


Fig. 5 Multipulse bunching train

2.3 噪声像脉冲态

进一步改变激光腔的偏振, 还可以得到噪声像脉冲。噪声像脉冲的特征是它的光谱非常宽, 并且它的光谱没有孤子态和多脉冲束缚态脉冲光谱具有的那种光谱边带, 而是很光滑的, 但噪声像脉冲没有规则的脉冲波形。噪声像脉冲是 HOROWITZ 等人在 1997 年首先观察到的^[10], 噪声像脉冲产生的机理被认为是激光腔内变换极限脉冲不断产生和崩溃的结果^[11]。

(下转第 554 页)

通量密度;当通信距离大于120m、 $V=700\text{m}$ 时,接收通量密度小于 $V=4\text{km}$ 时的接收通量密度。通过单散射模型得到,能见度 $V=700\text{m}$ 时的通信质量优于能见度 $V>2\text{km}$ 时的通信质量时的极限通信距离为120m。1阶多次散射模型仿真结果如图4所示,当通信距离为80m、 $V=700\text{km}$ 时,接收通量密度大于 $V=4\text{km}$ 时的接收通量密度,此时说明低能见度有利于散射通信;能见度为 $V=700\text{m}$ 时的通信质量优于能见度 $V>2\text{km}$ 时的通信质量时的极限通信距离为300m,与试验中的425m有一定的差距,但是远大于单散射模型中的120m。

仿真中,发射的光脉冲为脉冲响应,没有考虑脉冲宽度的影响。为了得到不同脉冲宽度对通量密度分布图的影响,可以将具有一定宽度的光脉冲看作是多个单位脉冲响应的积分。通过对发射单位脉冲响应得到的通量密度分布进行积分,就可以得到发射光脉冲宽度时的通量密度分布情况。考虑脉冲宽度影响时,主要改变了接收端脉冲形状,并且脉冲宽度越宽,脉冲通量密度分布改变越大,脉冲展宽越宽。随着距离的增加,脉冲宽度对通量密度分布及脉冲展宽的影响增大。对于短距离(3km范围内)紫外光大气信道模型研究时,为简化模型分析,可以不考虑脉冲宽度的影响^[8]。

5 结论

针对低能见度情况下单散射模型的适用的局限性,基于1阶多次散射理论,对Luegtten非直视单散射

信道模型进行修正。仿真结果表明,在低能见度情况下,修正模型更接近实验结果。存在差距的主要原因是,1阶多次散射理论适用于多次散射小于单次散射但又不能忽略的情况,其适用的能见度范围有待通过详实的试验数据进一步探讨验证。

参考文献

- [1] WU J, YANG Ch P, LIU J B. Optical propagation in the atmosphere [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 33-65 (in Chinese).
- [2] LUETTGEN M R, SHAPIRO J H, REILLY D M. Non-line-of-sight single-scatter propagation model [J]. J O S A, 1991, A8(12): 1964-1972.
- [3] NI G, ZHONG Sh D, LIU L D, et al. Study on ultraviolet communication through disengaged atmosphere [J]. Optical Technique, 2000, 26(4): 297-303 (in Chinese).
- [4] FENG T, CHEN G, FANG Z J. Atmospheric propagation model in non-line-of-sight optical scattering communication [J]. Chinese Journal of Laser, 2006, 33(11): 1522-1526 (in Chinese).
- [5] BAUM W A, DUNKELMAN L. Horizontal attenuation of ultraviolet light by the lower atmosphere [J]. J O S A, 1955, 45(3): 166-175.
- [6] TRAKHOVSKY E. Ozone amount determined by transmittance measurements in the solar-blind ultraviolet spectral region [J]. Appl Opt, 1985, 24(21): 3519-3522.
- [7] PENNDORF R. Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 μm and their application to atmospheric optics [J]. J O S A, 1957, 47(2): 176-182.
- [8] ZHANG J. Atmospheric channel model along with coding and decoding design for NLOS ultraviolet communication [D]. Chengdu: Electron Science and Technology University of China, 2007: 36-37 (in Chinese).

(上接第550页)

3 结论

基于非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器的腔体结构简单,可以实现全光纤集成,是产生超短脉冲的有效方法。实验结果表明,该被动锁模光纤激光器存在多种不同的工作模式,包括正常孤子态、多脉冲束缚态、噪声像脉冲态等。

参考文献

- [1] MA H Q, ZHAO W, ZHANG W, et al. Wavelength-tunable passively mode-locked fiber lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 190-192 (in Chinese).
- [2] YANG L Z, WANG Y C, CHEN G F, et al. Generation of ultrashort pulse at 1053nm from fiber laser [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 610-612 (in Chinese).
- [3] CAO L, YANG L Z, GUO X Y, et al. Experimental study Er^{3+} -doped fiber laser based on the nonlinear optical loop mirror [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 613-616 (in Chinese).
- [4] TANG D Y, ZHAO L M, LIN F. Numerical studies of routes to chaos

in passively mode-locked fiber soliton ring lasers with dispersion-managed cavity [J]. Europhysics Letters, 2005, 71(1): 56-62.

- [5] TANG D Y, ZHAO B, ZHAO L M, et al. Soliton interaction in a fiber ring laser [J]. Phys Rev, 2005, E72(6): 016616.
- [6] MALOMED B A. Bound solitons in the nonlinear Schrödinger-Ginzburg-Landau equation [J]. Phys Rev, 1991, A44(10): 6954-6957.
- [7] MALOMED B A. Bound solitons in coupled nonlinear Schrödinger equations [J]. Phys Rev, 1992, A45(12): R8321-R8323.
- [8] AFANASJEV V V, MALOMED B A, CHU P L. Stability of bound states of pulses in the Ginzburg-Landau equations [J]. Phys Rev, 1997, E56(5): 6020-6025.
- [9] TANG D Y, MAN W S, TAM H Y, et al. Observation of bound states of solitons in a passively mode-locked fiber laser [J]. Phys Rev, 2001, A64(3): 033814.
- [10] HOROWITZ M, BARAD Y, SILBERBER Y. Noiselike pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser [J]. Opt Lett, 1997, 22(8): 799-801.
- [11] TANG D Y, ZHAO L M, ZHAO B. Soliton collapse and bunched noise-like pulse generation in a passively mode-locked fiber ring laser [J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2289-2294.