

文章编号: 1001-3806(2010)03-0354-03

## 锁模光纤激光器中的矢量孤子簇

陈伟成<sup>1</sup>, 徐文成<sup>2</sup>

(1. 佛山科学技术学院 物理系, 佛山 528000; 2. 华南师范大学 信息光电子科技学院 光子信息技术实验室, 广州 510006)

**摘要:** 为了研究锁模光纤激光器中矢量孤子的动力学特征, 利用非线性偏振旋转锁模机制, 实验获得了矢量孤子及矢量孤子簇。矢量孤子簇表现出来的动力学特点与抽运功率与偏振设置有关。抽运功率越高, 由矢量孤子裂变所形成的矢量孤子簇对数越多。而且, 孤子簇脉冲序列在时域上显示出强度周期调制现象。实验中观察到强度周期调制的4阶和7阶脉冲矢量孤子簇。结果表明, 强度周期调制的矢量孤子簇输出是非线性偏振旋转锁模光纤激光器偏振调制的本征属性, 孤子簇周期强度调制现象归因于腔内偏振相关隔离器对孤子簇的周期偏振调制的结果。

**关键词:** 光纤光学; 光纤激光器; 矢量孤子; 强度调制

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.019

## Vector soliton bunches in mode-locked fiber lasers

CHEN Wei-cheng<sup>1</sup>, XU Wen-cheng<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Foshan University, Foshan 528000, China; 2. Laboratory of Photonic Information Technology, School of Information and Photoelectric Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic characteristics of the vector soliton in a mode-locked fiber laser, the vector soliton and the vector soliton bunches were obtained experimentally via nonlinear polarization rotation mode-locked mechanism. The dynamic characteristics of the vector soliton bunches are related to the pumping power and polarization bias. The higher the pumping power, the more are the pairs of the vector soliton bunch originating from the splitting of the vector soliton. Moreover, the vector soliton bunches show the periodic intensity modulation in the time domain. The periodic intensity modulation for the 4th and 7th vector soliton bunches was observed respectively. Experiment result shows that the output vector-soliton bunches are the inherent characteristics of the nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser. Moreover, the periodic intensity modulation phenomena owe to the periodic polarization modulation of the polarization-dependent isolator in the cavity.

**Key words:** fiber optics; fiber laser; vector soliton; intensity modulation

### 引言

光纤中的矢量孤子是指在双折射光纤中传输时, 能保持不变或周期性变化的偏振态和脉冲包络的孤子脉冲。在双折射光纤中传输时, 偏振态和脉冲包络都保持不变的矢量孤子, 称为偏振锁定矢量孤子; 偏振态和脉冲包络周期性演化变化的矢量孤子, 称为群速锁定矢量孤子。偏振锁定矢量孤子的特点是孤子脉冲在双折射环境中传输时, 能保持原有的偏振态和时域包络轮廓不变。它是非线性双折射与线性双折射精确平

衡的结果。群速锁定矢量孤子的特点是, 孤子的两偏振分量基于交叉相位调制效应反向漂移载频来实现偏振成分群速锁定, 但两偏振成分的相速度一般不相等, 因此, 在一般情况下脉冲偏振态在传输过程中会周期性地演化。矢量孤子具有脉冲包络稳定、可预知偏振态的良好特性使得其成为通信领域、光传感技术领域和相关光探测领域中的优越信息载体。矢量孤子的研究已成为非线性物理领域的前沿课题<sup>[1-3]</sup>。

如何获得矢量孤子一直是光纤激光技术的研究热点。1999年, CUNDIFF研究小组首次在线形腔光纤激光器中, 利用半导体可饱和布喇格反射镜作类饱和吸收体实现被动锁模, 获得了350fs~800fs偏振锁定矢量孤子脉冲输出, 揭开了研制矢量孤子光纤激光器的序幕<sup>[4-5]</sup>。这也是到目前为止, 唯一报道在光纤激光器中获得偏振锁定矢量孤子的实验研究。最近, 作者报道了非线性偏振旋转锁模光纤激光器中, 获得了椭圆偏振的78fs群速锁定矢量孤子均匀脉冲序列, 提出

基金项目: 佛山市科技发展专项基金资助项目(200701015); 广东省教育厅高校优秀青年创新人才培育项目(“育苗工程”)资助项目(LYM08099)

作者简介: 陈伟成(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤光学领域的研究工作。

E-mail: chenwch@163.com

收稿日期: 2009-04-09; 收到修改稿日期: 2009-05-25

了光纤激光器获得群速锁定矢量孤子的实验判据<sup>[6]</sup>。这些群速锁定矢量孤子在不同的抽运功率设置下有不同的动力学特征,例如,基频重复率的孤子脉冲序列出现周期性的峰值调制现象<sup>[7-8]</sup>,以及高阶谐波锁模矢量孤子现象<sup>[9]</sup>。这些孤子动力学特征现象在国内外文献中已有报道。但是,作者发现,群速锁定矢量孤子在光纤激光器中运转时还有一个新现象——伴随孤子簇及其峰值调制现象,这是一种不同于高阶谐波锁模矢量孤子的新现象。本文将介绍伴随孤子簇的现象,并对伴随孤子簇强度调制现象给予物理解释。

## 1 实验装置

被动锁模光纤激光器是研究孤子的重要装置<sup>[10-11]</sup>。图1是采用的非线性偏振旋转锁模光纤激

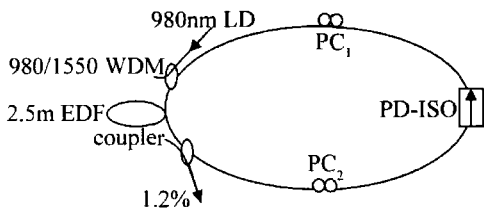


Fig. 1 Experimental setup of a nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser

光器的实验结构图。激光腔内有 2.5m 的掺铒光纤 (erbium-doped fiber, EDF), 一个偏振相关的隔离器 (polarization-dependent isolator, PD-ISO), 两个挤压式的偏振控制器 (polarization controller, PC), 一台 980nm 抽运激光光源, 一个 980/1550 波分复用器 (wavelength division multiplexing, WDM) 和一个耦合器。激光腔长大约 17m, 掺铒光纤在 980nm 和 1530nm 的吸收率为 12.5dB/m 和 20.8dB/m, 数值孔径为 0.22。980nm 抽运激光光源的中心波长为 974.8nm, 在单模尾纤中最大功率为 350mW。偏振相关隔离器是作者自行设计, 由一家光电企业加工制作, 其工作波长范围从 1528nm 到 1565nm, 隔离度大于 47dB。偏振相关隔离器在实验系统中既充当起偏器的作用, 即偏振相关的隔离器将随机偏振入射的光波转变为线偏振光, 又起到与实现被动锁模的光强敏感的非饱和吸收体的作用。耦合器的 1.2% 端口作为激光器的输出端。输出脉冲的频谱用 Anritsu MS9710C 型光谱仪来测量。带光电探测模块的示波器用于测量时域光脉冲。光电探测模块的响应波长范围是 1100nm ~ 1700nm, 测量带宽 300MHz。光电探测模块不足以准确测量脉冲的真实轮廓, 但能准确描述脉冲序列的强度与时域分布。

对于环形腔激光器, 腔内光脉冲演化的动力学演化过程如下: 一个幅度较小的光噪声信号在掺  $\text{Er}^{3+}$  光

纤的增益放大作用下被逐渐放大。光纤的非线性偏转效应 (自相位调制、交叉相位调制) 等效于一个自振幅调制可饱和吸收体, 作为环形腔光纤激光器的锁模机制。小信号噪声在自相位调制、交叉相位调制、群速度色散、 $\text{Er}^{3+}$  光纤的增益放大、增益饱和及有限带宽的共同作用下最终演化成稳定的锁模脉冲。实验中, 通过调整光纤偏振控制器的方位角来改变激光腔中的偏振设置, 以增强腔内加成锁模的自振幅调制作用, 就可以得到不同动力学特征的锁模激光脉冲输出。

## 2 实验结果与讨论

当抽运激光功率大于 50mW, 光纤激光器达到被动锁模自启动阈值, 调节偏振控制器, 信号激光频谱迅速展宽, 锁模脉冲形成。通过旋转偏振控制器的手柄, 锁模脉冲中心波长周期性地从短波往长波方向漂移, 脉冲中心波长漂移范围是从 1530nm ~ 1565nm。偏振控制器手柄的旋转调整有利于获得宽频谱的窄脉冲。图 2、图 3 分别是锁模脉冲的时域脉冲序列图和频谱图。中心波长为 1545nm, 3dB 带宽为 41.2nm, 重复率为 12.15MHz。脉冲序列有明显的基座, 这是因为高能量的矢量孤子, 由于高非线性效应在激光腔中自行压缩, 而使脉冲序列出现了基座。

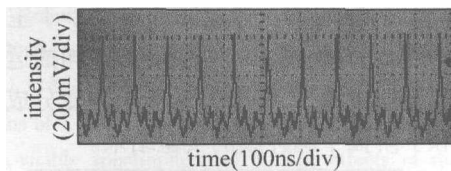


Fig. 2 The mode-locked pulse train

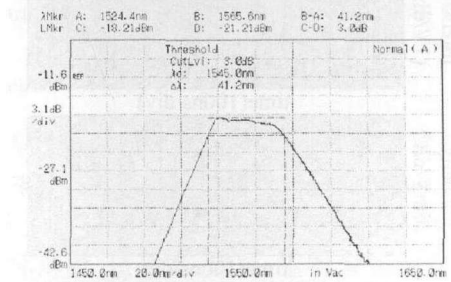


Fig. 3 The spectra of mode-locked pulses, resolution factor: 1nm

加大抽运功率, 调节偏振控制器设置激光腔中光脉冲的偏振状态以降低光脉冲在激光器中的损耗, 基态矢量孤子将放大为高阶孤子。高阶孤子在激光腔演化过程中最终出现孤子脉冲分裂现象。需要指出的是, 由于矢量孤子的偏振态从脉冲的前沿到后态沿都是均匀相同的, 所以, 从矢量孤子主脉冲分裂出来的小脉冲依然保持与主脉冲相同的偏振态。但由于小脉冲与主脉冲的能量不同, 在激光腔内演化过程中, 非线性偏振旋转锁模机制使得主脉冲矢量孤子与裂变出来的小矢量孤子脉冲的偏振态演化变得不同步 (在进入偏

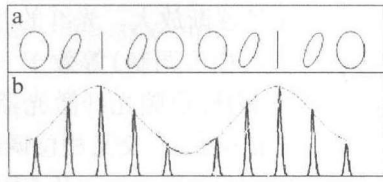


Fig. 4 Scheme of the periodic modulation of the concomitant vector solitons a—the polarization states of the concomitant vector solitons b—the pulse trains after the polarization-dependent isolator

振相关隔离器前脉冲序列的偏振态示意图见图4a)。而腔中的偏振相关隔离器则对矢量孤子脉冲串进行周期偏振调制,偏振调制效应将滤掉小矢量孤子脉冲的一部分能量,并将其偏振态调制成与主脉冲偏振态一致。主脉冲与小脉冲在激光腔演化振荡过程中周而复始地重复上述过程。如果用高分辨率的光电探测模块和示波器,就可以清晰看到矢量孤子脉冲的产生与分裂过程。这族由原来矢量孤子裂变而成的脉冲簇,即一个孤子脉冲形成一族脉冲簇,称之为伴随孤子簇。相对原矢量孤子脉冲的小脉冲称之为伴随孤子。矢量孤子脉冲簇的脉冲个数与激光腔的偏振设置与抽运功率有关。随着抽运功率的加大,主脉冲将进一步放大分裂。由于伴随孤子的出现,脉冲序列之间发生全局相互作用,从而调整在时域上脉冲序列的分布,最终使脉冲序列均匀分布。图5a是矢量孤子主脉冲分裂出伴随脉冲(卫星脉冲)的序列图。伴随脉冲强度小于主脉冲强度,且时间分布均匀。图5b和图5c为不同抽运功率激励与激光腔偏振设置下,一个矢量孤子裂变成4阶孤子脉冲簇和7阶孤子脉冲簇的实验结果。

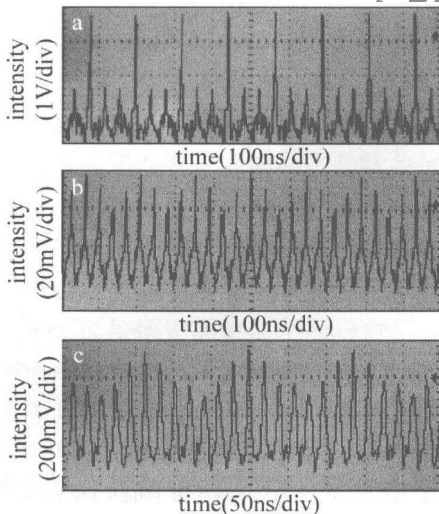


Fig. 5 The vector soliton bunches

a—the principal vector soliton and concomitant pulses b—the fourth order vector soliton bunches c—the seventh order vector bunches

实验中还有一个有趣的现象,伴随孤子脉冲簇的脉冲序列峰值强度出现明显的周期性正弦调制现象。实验结果中的锁模脉冲峰值周期调制是否是调Q脉冲的自锁模现象呢?比较一下有关调Q脉冲的自锁模现象。

参考文献[12]中描述了光纤激光器中调Q脉冲的锁模现象。从该文献中的图5可知,示波器中的Q脉冲(锁模脉冲簇峰值包络轮廓)电平归零,是一个完全的脉冲轮廓;而实验的锁模脉冲序列峰值包络轮廓出现调制现象,但包络轮廓电平并不归零,最低的调制峰值在10mV(最高峰值的一半),并不构成完全的脉冲轮廓,因而获得的并不是调Q脉冲。作者认为,出现这样的脉冲序列周期性强度调制现象的原因是,由于偏振相关隔离器中的起偏器对激光腔中光脉冲序列进行了周期偏振调制。图4是激光腔中偏振相关隔离器的周期偏振调制,导致脉冲序列强度出现正弦调制现象的示意图。偏振相关隔离器的起偏方向为竖直偏振方向。图4a是主脉冲与伴随孤子在偏振相关隔离器前的偏振态。图4b是偏振相关隔离器将不同偏振态的脉冲序列调制成时域上脉冲峰值调制。物理机制如下:一个矢量孤子因非线性效应裂变成几个伴随孤子。一个矢量孤子的裂变过程中,与原矢量孤子为中心形成强度对称的伴随孤子对。伴随孤子对的个数与抽运功率有关,抽运功率越高,裂变对数越多。不同的伴随孤子对强度不同。由于脉冲的偏振态演化与其强度有关,不同强度的伴随孤子偏振态在腔中的演化速度不同。经过激光腔中的偏振相关隔离器的偏振方向选择后,矢量孤子簇承受不同的偏振滤波。在偏振控制器调整过程,一般将入射到起偏器前的矢量孤子主脉冲的偏振态调节到与起偏器方向一致。与原矢量孤子位置对称的伴随孤子强度相同,偏振态演化相同,在偏振相关隔离器处所承受的损耗相同,在输出端形成强度相同的脉冲。最终,裂变的矢量孤子序列在示波器显示中形成强度周期性调制的脉冲序列。需要指出的是,图5中的各图是在不同偏振设置与抽运功率激励下的脉冲序列图,而且经过不同量的衰减后,输入到光电探测模块中进行测量,因而脉冲的输出电压大小有明显的差别。对于常见的高阶谐波锁模,输出的脉冲序列也有峰值涨落,但是不会出现规则性的周期调制现象。从光谱图看矢量孤子分裂形成的孤子簇,发现光谱图并没有发生太大的变化。这说明矢量孤子脉冲簇中的主脉冲基本保持原来基频锁模脉冲的脉冲宽度。

### 3 结论

实验中获得的矢量孤子脉冲,在不同的偏振设置与抽运功率激励下出现了脉冲分裂现象,一个矢量孤子脉冲形成一族脉冲簇。抽运功率越高,形成的矢量孤子簇对数越多。矢量孤子脉冲簇序列出现峰值强度周期调制现象,这不同于常见的高阶谐波锁模峰值强度随机涨落的现象。脉冲簇出现周期的峰值调制现象是腔内偏振相关隔离器对孤子簇周期偏振调制的结果。

(下转第388页)

率开始迅速降低,其因为光纤端面对光的反射影响了LD输出功率及耦合效率。

### 3 结论

LD 出射光束与铲形光纤的相位和模场均匹配时,可以获得较高的耦合效率。铲形光纤通过斜面压缩  $x$  轴上的发散角,使波面更加弯曲进而使相位愈加匹配。实验的结果比理论值稍小,这主要因为光纤端面没有加镀增透膜而带来菲涅耳反射,以及实际切割角度和切割深度的不一致所引入的误差;另一个原因是实际LD输出光束的束腰不对称,光束为类高斯光束<sup>[12]</sup>。当把这些原因考虑进去,理论计算值和实验结果相吻合。通过理论分析得到最优化的铲形光纤设计,从而有利于铲形光纤器件性能的改进,进而研制出高性能的铲形光纤器件,使铲形光纤得到更广泛地应用。

#### 参考文献

- [1] WANG Zh Sh, WANG X Y, SUN J F. Current status of laser applications and its developing trend [J]. OME Information, 2007, 24(8): 26-33 (in Chinese).
- [2] CHEN Sh W, HAN Q, HU Ch X, et al. Two practical fiber coupling optical systems for high power fiber-coupled laser diodes module [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(12): 1572-1576 (in Chinese).

- [3] YU H Y, ZOU D Sh, CUI B F, et al. Micro-lenses fibers for semiconductor laser coupling [J]. Semiconductor Optoelectronic, 2005, 26(5): 400-405 (in Chinese).
- [4] LIN B, ZENG X D, AN Y Y, et al. Analysis on the laser diode-multi-mode fiber coupling efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1200-1201 (in Chinese).
- [5] WANG Ch, FENG G Y, YANG H, et al. Calculating the coupling efficiency of the laser diode to the semi-tapered multimode fiber by ray-tracing method [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 434-437 (in Chinese).
- [6] WANG B H, JIANG M H, H Y L, et al. Improving coupling efficiency of optical fiber for high-power laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 195-199 (in Chinese).
- [7] LEVI L. Applied optics a guide to optical system design [M]. New York: Wiley, 1980: 451-456.
- [8] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 7th ed. London: Cambridge University Press, 1999: 752-754.
- [9] EDWARDS C A, PRESBY H M, DRAGONE C. Ideal micro-lenses for laser to fiber coupling [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(2): 252-257.
- [10] SAKAI J, KIMURA T. Design of a miniature lens for semiconductor laser to single-mode fiber coupling [J]. IEEE J Q E, 1980, QE16(10): 1059-1066.
- [11] WANG H X, XU Ch R. The Analysis of coupling properties between two tapered fibers [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2004, 10(4): 180-184 (in Chinese).
- [12] LI L N, WU J H, SONG J F. Far-field characteristics of high power laser diode [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2004, 25(1): 95-97 (in Chinese).

(上接第 356 页)

#### 参考文献

- [1] CHEN W Ch. Study on vector solitons in fibers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008(9): 31-37 (in Chinese).
- [2] RAND D, GLESK I, BRES C S, et al. Observation of temporal vector soliton propagation and collision in birefringent fiber [J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(5): 053902/1-053902/4.
- [3] YE F, KARTASHOV Y K, TORNER L. Vector soliton fission by reflection at nonlinear interfaces [J]. Opt Lett, 2007, 32(4): 394-396.
- [4] CUNDIFF S T, COLLINGS B C, AKHMEDIEV N N, et al. Observation of polarization-locked vector solitons in an optical fiber [J]. Phys Rev Lett, 1999, 82(20): 3988-3991.
- [5] CUNDIFF S T, COLLINGS B C, BERGMAN K. Polarization locked vector solitons and axis instability in optical fiber [J]. Chaos, 2000, 10(3): 613-624.
- [6] CHEN W Ch, XU W C, SONG F, et al. Vector solitons in femtosecond fibre lasers [J]. European Physical Journal, 2008, D48(2): 255-260.

- [7] WU J, TANG D Y, ZHAO L M, et al. Soliton polarization dynamics in fiber lasers passively mode-locked by the nonlinear polarization rotation technique [J]. Phys Rev, 2006, E74(4): 046605.
- [8] ZHAO L M, TANG D Y, ZHAO B. Period-doubling and quadrupling of bound solitons in a passively mode-locked fiber laser [J]. Opt Commun, 2005, 252(4): 167-172.
- [9] ZHANG S M, LÜ F Y, GONG Y D, et al. Different operation states of soliton pulses in an erbium-doped fibre ring laser [J]. Chinese Physics, 2007, 16(7): 1986-1990.
- [10] CAO L, YANG L Zh, 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): 613-619 (in Chinese).
- [11] YANG L Zh, 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).
- [12] ZHANG S M, LU F Y, WANG J. Self-Q-switching and mode-locking in an all-fiber  $Er/Yb$  co-doped fiber ring laser [J]. Opt Commun, 2006, 263(1): 47-51.