

文章编号: 0253-2239(2004)05-645-6

基于色散不对称光纤环形镜的锁模光纤激光器*

王肇颖 王永强 李智勇 贾东方 葛春风 张瑞峰 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在理论上数值计算了各种常量对色散不对称非线性光纤环形镜透射特性的影响,并分析了它作为被动锁模器件用于光纤激光器压窄脉冲的物理机制。利用 8 字形主被动混合锁模的结构在调制频率为 9.998748700 GHz, 波长为 1566.65 nm 处获得了 11 ps 的稳定锁模脉冲输出, 对应谱宽 0.297 nm, 同时在重复频率为 9.995792825 GHz 和 9.996778256 GHz 时分别得到了振幅均匀的二阶和三阶谐波锁模输出。证明色散不对称非线性光纤环形镜可以有效消减脉冲的尾翼和噪声, 得到脉幅稳定的脉冲序列。

关键词: 激光器; 光纤激光器; 色散不对称光纤环形镜; 主被动锁模; 8 字形

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Actively-Passively Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Laser with Dispersion-Imbalanced Nonlinear Optical Loop Mirror

Wang Zhaoying Wang Yongqiang Li Zhiyong Jia Dongfang Ge Chunfeng
Zhang Ruifeng Li shichen

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 12 June 2003; revised 18 July 2003)

Abstract: Simulation of the dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror's transmission characteristics with different parameters is made. The physical mechanism of using dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror to compress pulse in mode-locked fiber laser is analyzed theoretically. 11 ps stable mode-locked pulse train at 1566.65 nm with the modulation frequency of 9.998748700 GHz is obtained by using figure-eight actively-passively structure. Meanwhile, 2~3 harmonic mode-locked pulses with uniform amplitude are obtained at the modulation frequency of 9.995792825 GHz and 9.996778256 GHz respectively. It is demonstrated that dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror can effectively eliminate the wings and noise of pulse to obtained pulse train with uniform amplitude.

Key words: lasers; fiber laser; dispersion-imbalanced loop mirror; actively-passively mode-locking; figure-eight

1 引 言

光纤激光器在光通信中是一种极为重要的光源,近年来对其有关的研究颇多^[1~4]。其中非线性

光纤环形镜(NOLM)具有飞秒量级响应的自开关特性,可以作为等效可饱和吸收体用于被动锁模光纤激光器中^[5]。2002年,我们曾将非线性光纤环形镜作为被动环放置在 8 字型腔内构成主被动锁模光纤激光器,得到 2.5 GHz, 12 ps 锁模脉冲序列^[5]。非线性光纤环形镜的不对称性还可以通过在环境内不对称放置掺铒光纤得到,即非线性放大环形镜。1998年,Shenping Li^[6]采用非线性放大环形镜作为可饱和吸收体,利用谐波锁模技术,获得了重复频率

* 教育部博士点基金(1999005615)、国家自然科学基金(69877012)资助课题。

E-mail: wangdd@eyou.com

收稿日期:2003-06-12;收到修改稿日期:2003-07-18

11.08 GHz, 脉宽 7.1 ps 的近变换限脉冲。但是由于增益介质的饱和效应, 非线性放大环形镜对于单一脉冲和序列脉冲的响应将有显著的不同, 从而限制了激光器获得更高的重复速率^[7]。一种新型的光纤环形镜——色散不对称非线性光纤环形镜得到了广泛关注^[8~10]。它由两段具有不同色散特性的光纤构成。与非线性光纤环形镜和非线性放大环形镜相比, 色散不对称非线性光纤环形镜的独特之处在于由于色散只对脉冲起作用, 任何强度的连续光都无法从输出端透射。色散不对称非线性光纤环形镜内没有有源器件, 不会像非线性放大环形镜那样受到系统内前一脉冲的影响。同时, 它的构成还为设计者提供了更多的选择余地。本文从色散不对称非线性光纤环形镜的原理出发, 对其特性进行了数值分析, 并利用色散不对称非线性光纤环形镜代替非线性光纤环形镜构成新型的 8 字型主被动混合锁模光纤激光器, 得到了 9.998748700 GHz, 11 ps 脉冲序列输出。

2 色散不对称非线性光纤环形镜的特性分析

图 1 为一个典型的色散不对称非线性光纤环形镜结构图, 它包括一个 50/50 的耦合器、一段具有高负色散的单模光纤(SMF)和一段具有较低色散的色散位移光纤(DSF)。脉冲从 50/50 耦合器的一个端口输入并被分成相等的两束。顺时针传输的一束光经过单模光纤作用很快展宽, 峰值功率随脉冲的展宽而下降, 因此在色散位移光纤中得到很小的非线性相移。另一方面, 逆时针传输的一束光因色散位移光纤色散很小, 因而在色散位移光纤中仍然保持很窄的脉冲宽度, 并在单模光纤中得到很大的克尔非线性相移。当相向传输的两束光相位差等于 π

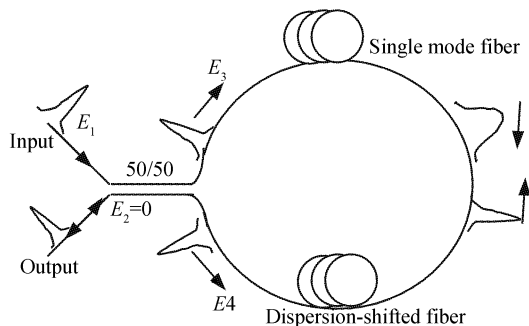


Fig. 1 Schematic of the dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror

时, 脉冲经过色散不对称非线性光纤环形镜得到最大的透射率。由于色散只对脉冲起作用, 因此任何强度的连续光输入都被反射掉了, 从而得到消减了尾翼和噪声的窄脉冲输出。

根据光纤耦合器的传输矩阵, 端口 1 和 2 的输入 E_1 、 E_2 经过耦合器后分成 E_3 和 E_4 两束相向传输的光, 即有^[11]

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{K} & i\sqrt{1-K} \\ i\sqrt{1-K} & \sqrt{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 K 为耦合器的分束比。 E_3 和 E_4 在光纤中的传输由非线性薛定谔方程描述, 其归一化的形式为^[12]

$$\frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{i}{2} p(\zeta) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + i|u|^2 u = 0, \quad (2)$$

其中 ζ 是以色散长度 L_D 归一化的距离,

$$L_D = T_0^2 / |\beta_2(0)|, \quad T_0 \approx 0.567 T_{FWHM},$$

T_{FWHM} 为脉冲的半峰全宽度, 时间 τ 由 T_0 归一化。 $p(\zeta) = \beta_2(\zeta) / \beta_2(0)$ 表示色散沿光纤的变化, 由于环形镜内色散是变化的, 色散由输入端的值 $\beta_2(0)$ 归一化。 $u = u(\zeta, \tau)$ 为归一化的脉冲振幅包络, 设入射脉冲为 sech 型,

$$u(0, \tau) = N \operatorname{sech}(\tau), \quad N^2 = \gamma P_0 T_0^2 / |\beta_2|,$$

其中 P_0 为入射脉冲的峰值功率,

$$\gamma = 2\pi n_2 / \lambda_0 A_{\text{eff}},$$

A_{eff} 为光纤中的有效模场面积, n_2 为非线性折射率参量。利用分步傅里叶法对光纤环内相向传输的两光脉冲用(2)式求解, 并在耦合器处再由(1)计算出透射光场, 得到色散不对称非线性光纤环形镜的透射率曲线并对其特性进行数值分析。在模拟计算中我们假设了两端光纤的连接损耗和反馈可以忽略, 同时不考虑相向传输两束脉冲之间的相互作用, 计算参量取 $T_0 = 2$ ps, $\lambda_0 = 1550$ nm, $\gamma = 2.2$ W⁻¹ · km⁻¹。单模光纤和色散位移光纤在输入脉冲中心波长处的色散值分别为 $D_{\text{SMF}} = 16.8$ ps/(nm · km) 和 $D_{\text{DSF}} = -0.8$ ps/(nm · km)。

图 2 给出了当单模光纤与色散位移光纤长度比 $L_{\text{SMF}} : L_{\text{DSF}} = 1 : 1$ 时色散不对称非线性光纤环形镜对脉冲和连续光的透射率曲线, 可以看到, 对于脉冲输入, 色散不对称非线性光纤环形镜有开关作用, 而对于连续光则完全不透过。也就是说, 色散不对称非线性光纤环形镜是一个对直流分量没有响应的“隔直滤波器”。

图 3 是光纤环形镜的总长度相等时, 对色散不对称非线性光纤环形镜和非线性光纤环形镜的透射率曲线的比较, 其中非线性光纤环形镜的耦合器分

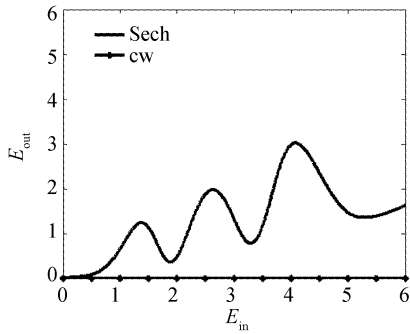


Fig. 2 Transmission functions of the dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror for pulses and CW operation

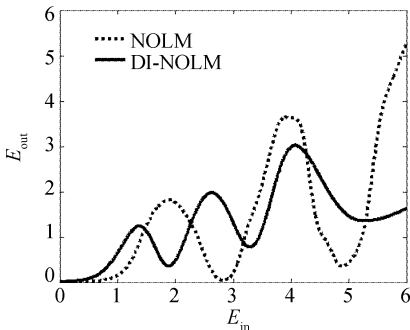


Fig. 3 Transmission characteristic of nonlinear optical loop mirror and dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror

束比为 40:60。从图 3 看出,达到色散不对称非线性光纤环形镜的第一个透射峰时所需要的能量要低于等长度的非线性光纤环形镜,但是色散不对称非线性光纤环形镜作为开关的关断性逊色于非线性光纤环形镜。

图 4 给出了色散不对称非线性光纤环形镜透射脉冲随入射光能量的变化。从图中看出,当入射光能量较低时,透射脉冲较宽且输出光强度较低,随着入射光能量的增加,透射脉冲逐渐被压窄,当入射光能量达到透射率曲线的第一个峰值时,光脉冲峰值

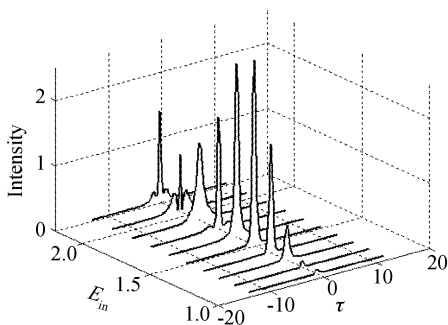


Fig. 4 Temporal evolution of transmitted pulse with input energy

部分将得到较大程度的透射而脉冲前后沿的透射较弱,这样色散不对称非线性光纤环形镜就形成了一种等效的饱和吸收效应,使输入光脉冲经过透射后得到压缩,如果入射光能量进一步增加,透射脉冲将产生分裂,这与非线性光纤环形镜的特性是一致的。

如果改变构成色散不对称非线性光纤环形镜各段光纤的长度或色散,其透射率曲线也随之发生改变。图 5 为固定色散位移光纤的长度,改变单模光纤与色散位移光纤的长度比时,得到的透射率曲线。从图可看出,随着单模光纤长度的增加,两光脉冲之间的非线性相移差可以更快的达到 π ,这样达到第一个透射峰时所需要入射能量也越低,从而得到更好的开关特性。

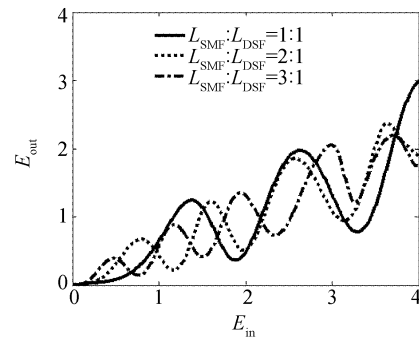


Fig. 5 Energy transfer characteristics for different fiber length ratio

以上讨论的是在入射脉冲无啁啾的情况下得到的透射率曲线。当输入脉冲有啁啾时,色散不对称非线性光纤环形镜的透射率曲线也不相同,如图 6 所示。当初始脉冲具有负啁啾时,达到第一个透射峰所需要的能量最低,这是因为顺时针传输的带有负啁啾的脉冲被单模光纤迅速展宽,因而导致其峰值功率的大幅度下降,在色散位移光纤中的非线性相移很弱;而逆时针传输的带有负啁啾的脉冲被色散位移光纤压缩,峰值功率上升,在色散位移光纤和单模光纤中得到更大的非线性相移,这样相向传输的两脉

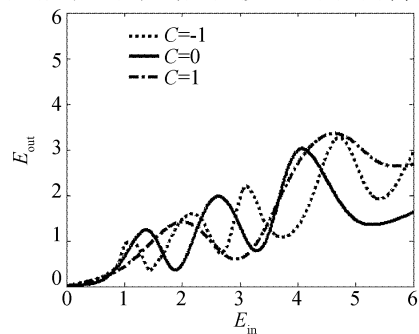


Fig. 6 Energy transfer characteristics for different initial chirp

冲之间的相位差增大,得到更高的透射率。因此可以在色散不对称非线性光纤环形镜的输入端利用一段单模光纤引入负啁啾,降低达到色散不对称非线性光纤环形镜第一个透射峰所需的人射能量。

从上述讨论可以看出,只要光纤的色散特性在环形镜内不对称地安排就可以构成色散不对称非线性光纤环形镜,这种构成决定了它可以为设计者提供更多的选择余地。我们可以改变不同种光纤的数量、各段光纤的长度比、各段光纤的色散特性、光纤环形镜的总长度以及入射脉冲的啁啾来优化色散不对称非线性光纤环形镜的开关特性,相比之下,非线性光纤环形镜可以改变的参量仅仅是环形镜耦合器的分束比和环形镜的长度。

3 实验结果和讨论

我们根据色散不对称非线性光纤环形镜的特性将它作为等效可饱和吸收体放置在主动锁模光纤激光器的环内,构成 8 字型主被动锁模光纤激光器,如图 7 所示。其中单模光纤和色散位移光纤与 3 dB 耦合器和偏振控制器 PC2 共同构成色散不对称非线性光纤环形镜。激光器的主动环内包括 IREPOLUS 公司的 EAD60 型光纤放大器,输出带宽为 1530~1570 nm,饱和输出功率为 18 dBm; IOC 公司的 10GHz M-Z 型 LiNbO₃ 调制器,射频调制信号

源由 HP 公司的 83752 型频率合成器提供;输出耦合器分束比为 10:90。输出信号由 Agilent 的 86100B 40G 数字通信分析仪和 Ando 的 AQ-6315A 光谱仪观测。实验证明,色散不对称非线性光纤环形镜作为被动锁模器件,可以有效的压缩脉冲并消除激光器内的自发辐射噪声。

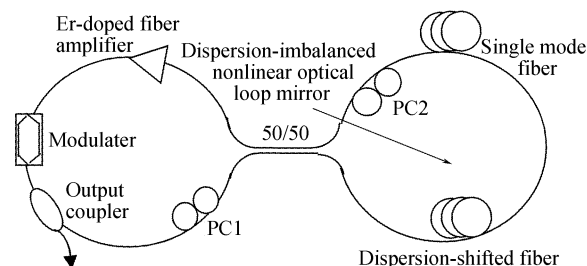


Fig. 7 Experimental setup of figure-eight actively-passively mode-locked fiber laser

在实验中,我们选择色散位移光纤长度为 100 m,对单模光纤长度为 50 m 和 200 m 的情况分别进行了实验。单模光纤长度为 50 m 时,仔细调节射频调制信号和偏振控制器,可以得到 9.99936748 GHz 稳定的锁模脉冲序列及其对应的光谱图,如图 8 所示。此时对应的调制器的静态偏压为 6 V,调制器射频驱动功率为 -3.5 dBm。输出脉冲宽度由示波器判读为 20 ps,考虑示波器响应时间和取样平均次数,其脉宽实际为 14 ps,对应脉冲谱宽为 0.252 nm,中心波长 1566.624 nm,时间带宽积为 $\Delta T \cdot \Delta \nu = 0.430$ 。

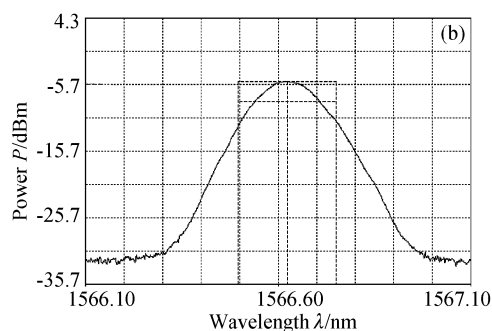
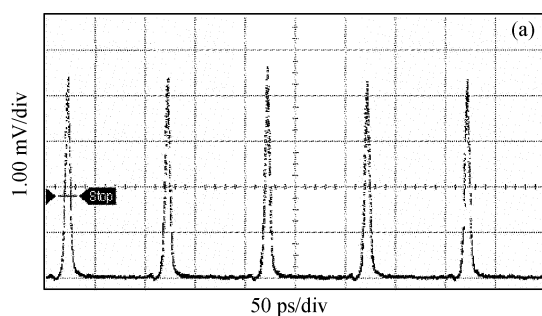


Fig. 8 Model-locked pulse train (a) and spectrum (b) of actively-passively mode-locked fiber laser $L_{DSF} = 100$ m, $L_{SMF} = 50$ m

单模光纤长度为 200 m 时,得到的 9.998748700 GHz 锁模脉冲序列及其对应的光谱图,如图 9 所示。输出脉冲宽度由示波器判读为 17 ps,考虑示波器响应时间和取样平均次数,其脉宽实际为 11 ps,对应脉冲谱宽为 0.297 nm,中心波长为 1566.55 nm,时间带宽积为 $\Delta T \cdot \Delta \nu = 0.398$ 。从图中可以看出,当单模光纤为 200 m 时得到的实

验结果更好,这与前面理论分析的结果是一致的。但是考虑到过长的光纤环路会造成激光器因温度和机械振动的不稳定,因此我们没有选择更长的单模光纤进行实验。另外,仔细调节射频调制信号,在频率分别为 9.995792825 GHz 和 9.996778256 GHz 时还得到了二阶和三阶有理数谐波锁模输出,其锁模脉冲波形如图 10 所示。

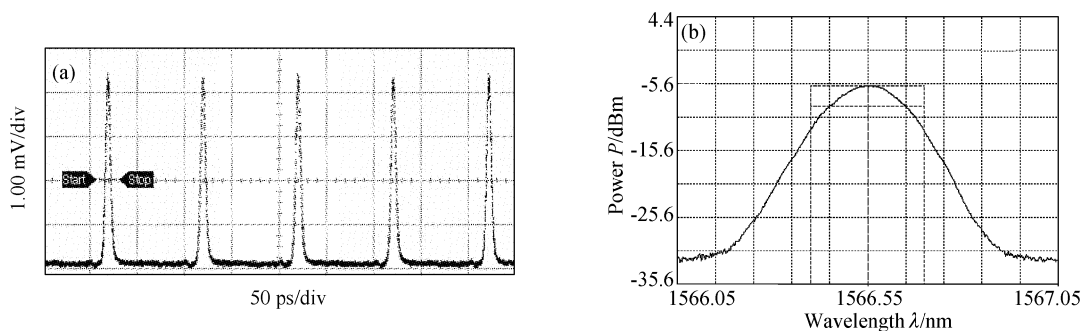


Fig. 9 Mode-locked pulse train (a) and spectrum (b) of actively-passively mode-locked fiber laser $L_{\text{DSF}}=100$ m, $L_{\text{SMF}}=200$ m

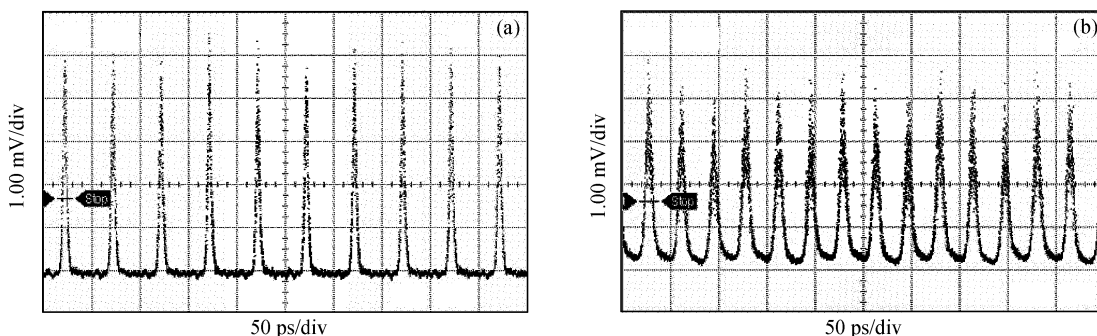


Fig. 10 Output pulse train of 2RH (a) and 3RH (b) from actively-passively mode-locked fiber laser

作为比较,我们在图 7 所示的环路中去掉色散不对称非线性光纤环形镜,构成一个环型主动锁模光纤激光器,其输出的锁模脉冲序列和光谱如图 11 所示,此时输出脉冲宽度由示波器判读为 23 ps,考虑示波器响应时间和取样平均次数,其脉宽实际为 17 ps,对应脉冲谱宽为 0.247 nm,中心波长 1566.68 nm,时间带宽积为 $\Delta T \cdot \Delta \nu = 0.512$ 。比

较图 8~图 11 不难看出,由色散不对称非线性光纤环形镜构成的主被动锁模光纤激光器输出锁模脉冲序列的质量较未通过色散不对称非线性光纤环形镜作用时所得到的同样阶数的锁模脉冲序列质量有了明显提高,可见色散不对称非线性光纤环形镜的存在可以有效抑制腔内各种噪声对输出脉冲质量的影响并使脉冲窄化。

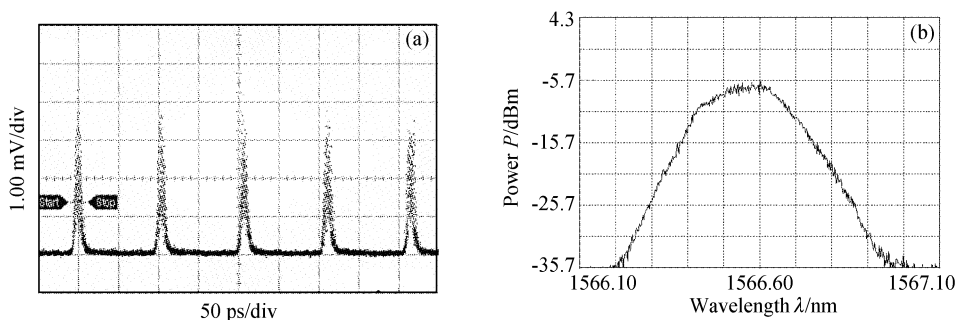


Fig. 11 Output pulse train (a) and spectrum (b) of actively ring mode-locked fiber laser

参 考 文 献

- 1 Yang Shiquan, Li Zhaohui, Xiang Yang *et al.*. Wavelength tunable dual-wavelength actively mode-locked fiber laser with F-P LD as modulator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(4):472~475 (in Chinese)
- 2 Sun Hongzhi, Liang Jianzhong, Hu Yimei *et al.*. A high efficient tunable Yb doped double cladding fiber laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(11):1372~1374 (in

- Chinese)
- 3 Zhao Chunliu, Ma Ning, Dong Xinyong *et al.*. Wavelength tunable mode-locked fiber ring laser utilized by the dispersion of CFBG. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):822~824 (in Chinese)
- 4 Song Lijun, Li Shichen, Ge Chunfeng *et al.*. Generation of amplitude-equalized pulses from rational harmonic mode-locked fiber ring laser. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **28**(10):881~884 (in Chinese)

- 5 Ilday F O, Wise F W. High-energy femtosecond stretched-pulse fiber laser with a nonlinear optical loop mirror. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(17):1531~1533
- 6 Wang Zhaoying, Yu Zhenhong, Ge Chunfeng *et al.*. Figure-eight actively-passively mode-locked erbium-doped fiber laser. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(3):128~130
- 7 Li Shenping, Lou Caiyun, Chan KT. Rational harmonic active and passive modelocking in a figure-of-eight fiber laser. *IEEE Electron. Lett.*, 1998, **34**(4):375~376
- 8 Duling I N, Chen C N, Wai P K A *et al.*. Operation of a nonlinear loop mirror in a laser cavity. *IEEE Quant. Electron.*, 1994, **30**(1):194~199
- 9 Wong W S, Namiki S, Margalit M *et al.*. Self-switching of optical pulses in dispersion-imbalanced nonlinear loop mirrors. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(15):1150~1152
- 10 Lima J L S, Sombra A S D. Soliton and quasi-soliton switching in nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion decreasing fiber. *Opt. Commun.*, 1999, **163**(4~6):292~300
- 11 Seong N H, Kim D Y. Experimental observation of stable bound solitons in a figure-eight fiber laser. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(15):1321~1323
- 12 Agrawal G P. *Applications of Nonlinear Fiber Optics*. University of Rochester: Academic Press, 2001



征 订 启 事

《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16开, 1541页, 定价: 100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。手册包括 25 个光学分科, 5 个附录, 2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详细得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每册 100 元, 光盘版为每张 50 元。

本期增刊共收录了 170 多篇论文, 约 600 多页。出版时间为 2004 年 3 月。论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果, 显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每套 100 元, 光盘版为每张 50 元。

论文集共收录论文 436 篇, 800 多页, 分上下两册。对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918428, 021-69918011

请从邮局汇款 地址: 上海 800-211 信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800

光学期刊联合编辑部

2004 年 4 月