

初始脉冲对光克尔脉冲净化器时谱特性影响分析

邓颖 王建军 林宏奂 张锐 许党朋 黄小东 李晶 李明中

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 基于忽略相干耦合项的无色散耦合模方程, 模拟分析了初始脉冲的啁啾特性及脉冲形状对光克尔脉冲净化器输出脉冲时谱特性及能量透射率等的影响。结果表明, 高斯脉冲的时间波形窄化较严重, 初始啁啾对时间波形及能量透射率无影响, 但对输出光谱影响较大; 方波脉冲的时间波形和光谱形状的变化很小, 且能量透射率有很大提高。

关键词 非线性光学; 光克尔效应; 耦合模方程; 时谱特性; 能量透射率

中图分类号 O437; TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0105001

Analysis of the Temporal and Spectral Characteristics of Output Pulse for an Optical Pulse Cleaner under Different Initial Pulses

Deng Ying Wang Jianjun Lin Honghuan Zhang Rui Xu Dangpeng

Huang Xiaodong Li Jing Li Mingzhong

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The temporal and spectral characteristics of output pulse for an optical pulse cleaner under the input pulses with initial chirps and different shapes were analyzed, by solving the coupling mode equations, which ignored coherent coupling part and neglected chromatic dispersion of the fiber. It was concluded that, the Gauss pulse's temporal shape was narrowed seriously after the pulse cleaner, and the initial chirps and the energy transmittance were independent of the initial chirps, but the output spectrum were quite different with the initial chirps. When the temporal shape of the input pulse was square, the output pulse's temporal shape and the spectral shape were both changed slightly but the energy transmittance was highly enhanced.

Key words nonlinear optics; optical Kerr effect; coupling mode equations; temporal and spectral characteristic; transmittance energy

OCIS codes 060.2420; 190.4370; 320.5540

1 引言

随着短脉冲激光技术的发展, 目前实验室条件下已可获得约 10^{22} W/cm² 的聚焦光强, 并朝着更高的目标而努力^[1]。超高的聚焦光强(大于 10^{18} W/cm²)将创造出前所未有的极端物理条件, 为强场物理、激光核物理和高能量密度物理等许多领域的实验研究提供手段, 因此, 各国都在积极建造超短超强激光装置^[2~7], 并积极探索信噪比提高的有效方式, 以避免等离子体的危害。与固体激光器相比, 光纤激光器因其拥有更高的转换效率、更小的热光效应、高可靠

性、高稳定性、低运行成本、结构紧凑、易实现小型化与全固化等优点, 因此新的高能拍瓦激光装置将采用全光纤的前端系统^[8]。但多级放大引起较高的自发辐射放大(ASE)基座, 目前光纤前端系统的信噪比较低, 非常不利于整个装置信噪比的控制, 因此必须采取措施提高光纤前端系统的信噪比。利用光纤中光克尔效应来提高脉冲的信噪比, 是一种简单而有效的方法, 广泛用于提高压缩脉冲的信噪比, 并取得一定成效^[8~10], 但鲜见对输出脉冲时间波形及光谱特性的分析。本文从利用光纤中光克尔效应提高

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(60878058)和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(9140C6803010905)资助课题。

作者简介: 邓颖(1981—), 女, 助理研究员, 主要从事光波导激光技术方面的研究。E-mail: tjudengying@sina.com.cn

脉冲信噪比原理出发,重点分析初始脉冲对光克尔脉冲净化器输出脉冲时谱特性的影响,对利用光纤中光克尔效应提高脉冲信噪比的实际应用具有一定的意义。

2 光克尔脉冲净化器的理论模型

2.1 光克尔脉冲净化器原理

光克尔效应是指在强光场作用下,非线性晶体表现出双折射现象。强脉冲引起非线性偏振旋转^[11~14],响应时间 $2\sim 4$ fs,当脉冲通过光纤和检偏器时,其透射率与强度有关,使脉冲中心较强部分通过,而脉冲的低强度基座被阻挡,从而达到提高信噪

比的目的^[10]。光克尔脉冲净化器主要由一对垂直放置的起偏与检偏器、一个用于改变注入线偏振光的偏振方向的 $\lambda/2$ 波片和一段用于发生光克尔效应的光纤组成,如图1所示。光脉冲经过起偏器P1后输出线偏振光,振幅为 A_0 。再经 $\lambda/2$ 波片后与光纤主轴成 θ 角入射,通过控制光纤的长度、注入光功率以及 θ 角,使线偏振光脉冲的高强度部分发生非线性偏振旋转,而低强度的基座没有非线性偏振旋转。然后再经一个与起偏器垂直放置的偏振片P2,输出脉冲振幅为 A 使偏振方向未发生旋转的基座被P2抑制而偏振方向发生旋转的脉冲高强度部分高透,从而达到提高脉冲信噪比的目的。

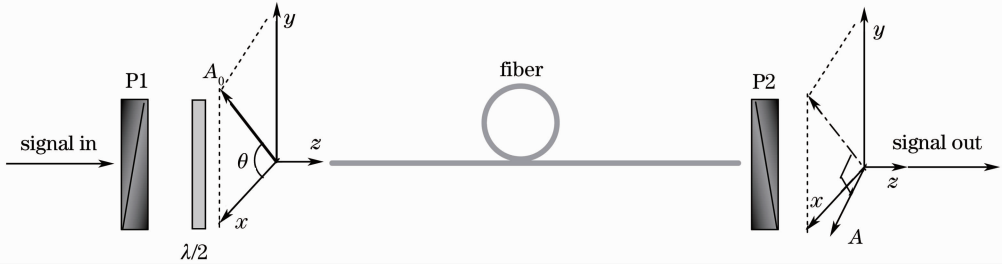


图1 光克尔脉冲净化器原理图

Fig. 1 Pulse cleaner based on optical Kerr effect

2.2 超短脉冲传输理论模型

假定非线性效应对光纤模式无显著影响,描述两偏振分量沿光纤变化的耦合模方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_x}{\partial z} + \beta_{1x} \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_x &= i\gamma |A_x|^2 A_x + \frac{2i\gamma}{3} |A_y|^2 A_x + \frac{i\gamma}{3} A_x^* A_y^2 \exp(-2i\Delta\beta z), \\ \frac{\partial A_y}{\partial z} + \beta_{1y} \frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_y &= i\gamma |A_y|^2 A_y + \frac{2i\gamma}{3} |A_x|^2 A_y + \frac{i\gamma}{3} A_y^* A_x^2 \exp(-2i\Delta\beta z), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $A_j(z, t)$ 是慢变振幅, β_{0j} 是相应传播常数, $j = x, y$ 分别表示 x, y 方向偏振; $\Delta\beta = \beta_{0x} - \beta_{0y}$ 与光纤模式双折射有关; β_{1j} 为模群速度倒数; β_2 为色散系数; γ 为光纤的非线性系数; α 为光纤的损耗系数。

3 初始脉冲对光克尔脉冲净化器输出脉冲时谱特性的影响

以 $L=300$ m,光纤非线性系数 $2 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$,脉冲半峰全宽 500 ps,脉冲峰值功率 30 W,中心波长 1053 nm,入射脉冲偏振角为 37° 为例,计算初始脉冲的啁啾以及脉冲形状等对输出脉冲时谱特性的影响。由于石英光纤的色散系数为 17.2 ps/km,对于本例模拟计算,色散导致的展宽量只有几个皮秒,因此忽略色散的影响,并采用四阶龙格库塔法解耦合模方程。

3.1 初始脉冲啁啾特性的影响

图2主要计算了初始啁啾为正啁啾情况下,输

出脉冲的光谱变化情况。图2(a)为无啁啾高斯脉冲经过光克尔脉冲净化器的输出光谱,可以看出光克尔效应导致较大的正频率啁啾,光谱展宽很多并出现振荡峰;图2(b)~(d)分别为初始啁啾 $C=5, 10$ 和 60 的正啁啾高斯脉冲输出光谱,可以看到由于初始正啁啾的作用,光谱展宽,但随着初始啁啾量的增大,由光克尔效应引起的光谱展宽的影响变弱,并且振荡峰结构逐渐变缓,当初始啁啾 $C=60$ 时,输出脉冲光谱变得很平坦。

图3主要计算了初始啁啾为负啁啾情况下,输出脉冲的光谱变化情况。图3(b)~(d)分别为初始啁啾 $C=-5, -20$ 和 -35 的负啁啾高斯脉冲输出光谱,可以看出由于初始负啁啾的作用,光谱也被展宽,并补偿光克尔效应引起的正啁啾,随着初始负啁啾的增大,输出光谱不断被压窄。

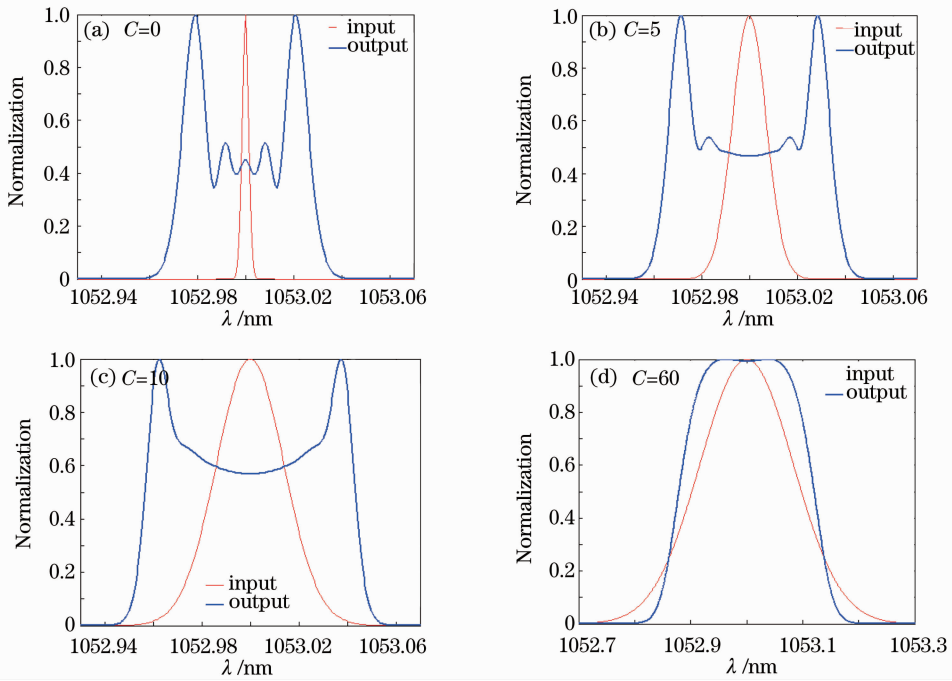


图2 不同输入情况下的高斯脉冲输出光谱
Fig.2 Output pulse's spectra for different inputs

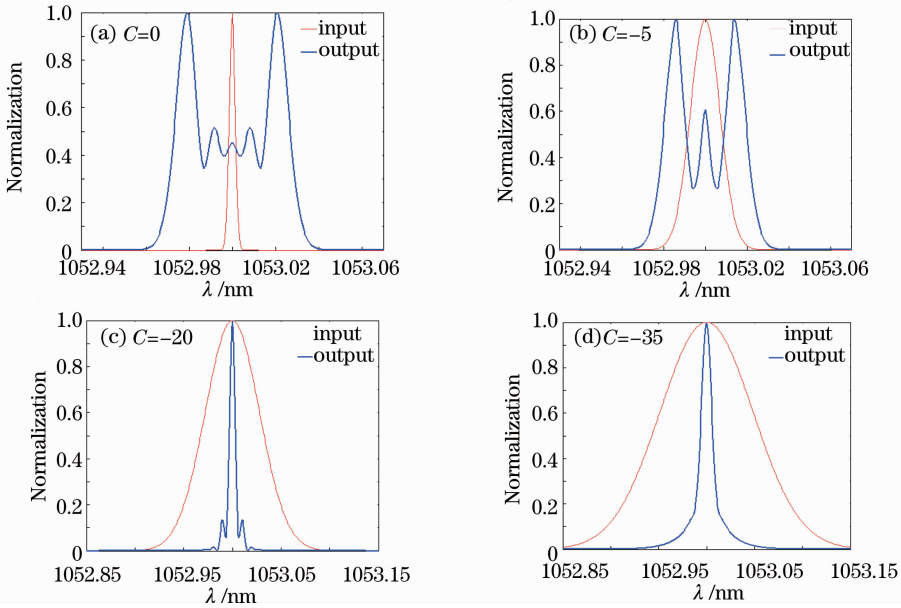


图3 初始输入为负啁啾时输出脉冲的光谱
Fig.3 Output pulse's spectra for Gauss-shape with different minus initial chirps

由于初始啁啾并不影响脉冲的时间波形，因而不论初始啁啾为正或为负，其输出的脉冲时间波形不随初始啁啾的变化而变化，因此其能量透射率亦不变。图4(a)给出了啁啾高斯脉冲的时间波形变化情况，图4(b)给出了啁啾高斯脉冲的能量透射率，其能量透射率为70%。

3.2 初始脉冲时间波形对输出脉冲时谱特性的影响

图5主要计算了无啁啾超高斯脉冲的时间波形与光谱变化情况。图5(a),(c),(e)计算了超高斯脉冲的指数因子 m 分别为1(即高斯脉冲),2和20时的脉冲时间波形的变化；而图5(b),(d),(f)计算的是对应脉冲的光谱变化。可以看到，高斯脉冲的

时间波形窄化比较严重,随着超高斯脉冲指数因子的增大脉冲窄化效应减弱,并且对应光谱的变化也越来越小,即当初始超高斯脉冲的指数因子增至脉

冲时间波形近似为方波时,经光克尔脉冲净化器后输出脉冲的时间波形基本不变,而光谱形状有很微小的变化。

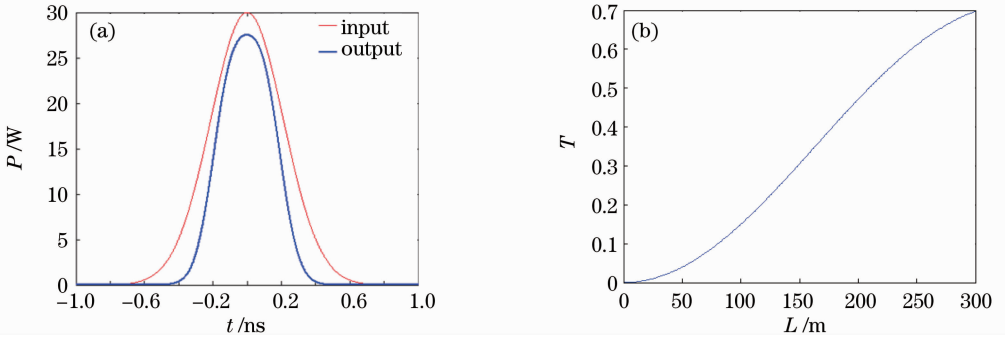


图 4 啁啾高斯脉冲的时间波形变化(a)和能量透射率(b)

Fig. 4 Temporal shape (a) and energy transmittance (b) of output pulse for the Gauss-shape pulse with initial chirp

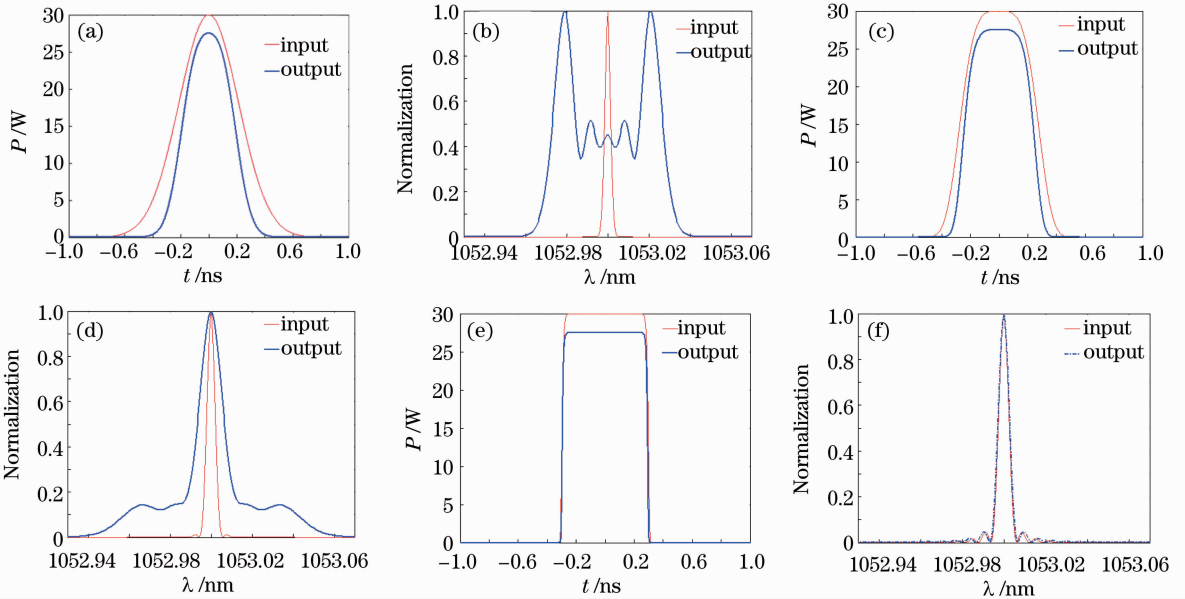


图 5 不同指数因子下无啁啾超高斯脉冲的时间波形和光谱变化。(a),(b) $m=1$; (c),(d) $m=2$; (e),(f) $m=20$

Fig. 5 Input and output pulsed's temporal shapes and spectra for super Gauss-beam under different m . (a),(b) $m=1$; (c),(d) $m=2$; (e),(f) $m=20$

图 6 计算了啁啾超高斯脉冲的时间波形与光谱变化以及脉冲能量透射率。图 6(a)~(c)分别为 $C=0, 20$ 和 -20 的指数因子为 20 的高斯脉冲的光谱变化,可以看出无啁啾方波的脉冲光谱有微小的变化,而初始啁啾的引入使输入输出脉冲光谱形状基本无变化。图 6(d) 计算了超高斯脉冲的能量透射率,随着指数因子的增加,脉冲的能量透射率由高斯脉冲时的 70% 提高到方波脉冲时的 90% 以上。

4 结 论

详细分析了初始脉冲的啁啾与脉冲的形状对光纤中光克尔效应输出脉冲的时间与光谱以及脉冲的能量透射率等特性的影响。对于注入的高斯脉冲,输出脉冲时间波形窄化较严重,且由于光克尔效应引入正啁啾使脉冲光谱有较大展宽并出现明显的振荡峰;但随着引入初始正啁啾量的增大,由光克尔效应引起的光谱展宽的影响变弱;而初始的负啁啾补

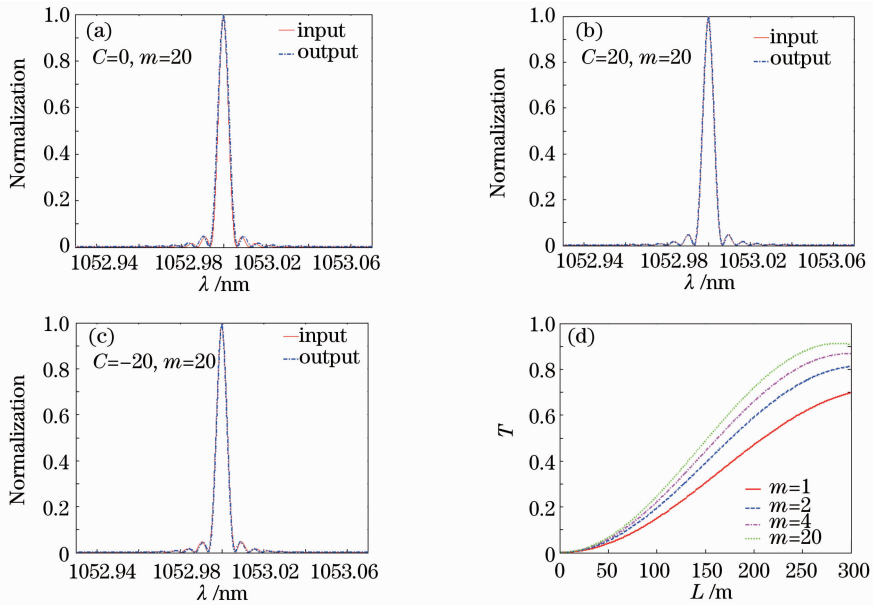


图6 啁啾超高斯脉冲的光谱(a)~(c)及能量透射率(d)

Fig. 6 Spectra (a)~(c) and energy transmittance (d) for super Gauss beam

偿光克尔效应引起的正啁啾,但随着啁啾量的增大,输出光谱不断被压窄。对于注入的超高斯脉冲,当高斯脉冲指数因子增大到方波时,输出脉冲的时间波形和光谱形状基本不变,并且能量透射率增大。因此,利用光纤中光克尔效应提高信噪比的方法用于抑制方波脉冲的 ASE 基座时,对脉冲的时谱特性影响很小,且能量透射率更高。

参 考 文 献

- 1 Peng Hansheng. Ultraintense solid state lasers and applications to the frontiers of sciences [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 721~729
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 721~729
- 2 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 160~162
- 3 M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane *et al.*. 0. 85-PW 33-fs Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1594~1596
- 4 Y. Kitagawa, Y. Sentoku, S. Akamatsu *et al.*. Progress of fast ignitor studies and petawatt laser construction at Osaka university [J]. *Phys. Plasmas*, 2002, **9**: 2202~2207
- 5 C. N. Danson, P. A. Brummitt, R. J. Clarke *et al.*. Vulcan petawatt-a high intensity interaction facility [J]. *Fusion*, 2004, **44**: 239~249
- 6 N. Blanchot. Sub-100TW pulses generation with optical intensities in excess of 10^{19} W/cm²[C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 310~315
- 7 Peng Hansheng, Huang Xiaojun, Zhu Qihua *et al.*. 286-TW Ti:sapphire laser at CAEP [C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 1~5

- 8 Andrew J. W. Brown, Johan Nilsson, Donald J. Harter. High energy, short pulse fiber laser front end for kilo-joule class CPA systems [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 610214
- 9 B. Nikolaus, D. Grischkowshy, A. C. Balant. Optical pulse reshaping based on the nonlinear birefringence of single-mode optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(3): 189~191
- 10 Govind P. Agrawal, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.*. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang. Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 177~189
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 177~189
- 11 Zhang Zuxing, Sang Minghuang, Ye Zhiqing *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 648~652
张祖兴, 桑明煌, 叶志清等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 648~652
- 12 Tian Jiajun, Yao Yong, Sun Yunxu *et al.*. Study on generation of the multiwavelength laser using the symmetric nonlinear optical loop mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 787~792
田佳俊, 姚勇, 孙云旭等. 利用对称非线性光纤环镜产生多波长激光的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 787~792
- 13 Xu Huiwen, Yang Hua, Wen Shuangchun *et al.*. Tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2272~2276
徐慧文, 杨华, 文双春等. 基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺饵光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2272~2276
- 14 Zhao Yu, Liu Yongzhi, Zhao Deshuang *et al.*. Study on side bands in passively mode-locked fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 991~995
赵羽, 刘永智, 赵德双等. 被动锁模光纤激光器光谱边带[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 991~995