

# 啁啾堆积脉冲在线性介质中传输特性研究

夏彦文 孙志红 唐 军 刘 华 彭志涛 徐隆波

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 采用啁啾脉冲堆积的方法获得平顶宽脉冲, 根据波包传输近似方程, 数值模拟了堆积脉冲在线性介质中的传输特性, 给出了初始堆积子脉冲延迟引入不同初始位相差和不同啁啾量情况下堆积脉冲时间波形传输的演变规律。结果表明, 子脉冲间距差引入的初始延迟参数的细微变化就会引起初始位相差的显著变化, 导致堆积脉冲包络相对于子脉冲延迟参数不稳定; 包络脉冲的特性与子脉冲的载频、脉冲形状、脉宽和啁啾量等子脉冲参数, 及子脉冲间的延迟参数等有关; 啁啾越大、子脉冲初始脉宽越短、传输介质色散系数越大, 则传输后的堆积脉冲时间调制变化越严重。

**关键词** 光纤光学; 啁啾堆积脉冲; 线性传输; 脉冲展宽

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3286

## Research on Pulse Evolutionary of Chirped Pulse Stacking in Linear Medium

Xia Yanwen Sun Zhihong Tang Jun Liu Hua Peng Zhitao Xu Longbo

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

**Abstract** The flat topping width pulses are obtained by the method of twitter pulse stack. According to the approximately equation of the pulse transmission equation, the transmission characteristic of the stack pulse in linear medium have been analyzed theoretically, and the time profile change rule of the tack pulse are given. It is show that the stack pulse envelope antithetical couplet pulse delay parameter is unstable. If the twitter is greater, the sub-pulse initial pulse width is shorter, and the transmission medium dispersion coefficient is bigger, then the stack pulse time modulation become more serious after the transmission.

**Key words** fiber optics; chirped pulse stacking; linear pulse propagation; pulse broadening

### 1 引 言

在惯性约束聚变研究中, 为了有效提高靶丸对激光的吸收, 提高靶丸的压缩效率, 抑制压缩中产生的不稳定性<sup>[1]</sup>, 要求激光具有精确的时间脉冲整形, 目前多采用电脉冲整形法<sup>[2]</sup>。20 世纪 90 年代日本大阪大学激光工程研究所在升级 GEKKO-Ⅺ 装置时提出一种采用脉冲堆积技术<sup>[3,4]</sup>进行脉冲整形: 超短激光脉冲经啁啾展宽至上百皮秒的基元脉冲, 经时间延迟的方式将基元脉冲分成子脉冲串, 然后通过调节脉冲串数目、束间延迟、脉冲幅度的方法得到任意形状的宽脉冲; 国内对此也进行了相关的研究<sup>[5,6]</sup>。为了满足惯性约束聚变精密物理实验对功

率平衡的要求, 激光脉冲时间波形的精密诊断愈显重要, 随着高功率激光装置的建立, 激光束数的不段增加, 采用光纤作传输介质是大幅降低系统造价、提高诊断系统的抗干扰能力、保证激光脉冲波形测量精度的有效方法<sup>[7~10]</sup>。研究啁啾脉冲堆积方法获得的宽带整形脉冲在光纤中的传输特性对高功率激光装置时间脉冲波形的精确诊断是非常重要的。

由麦克斯韦方程组所得到的波包传输的近似方程, 理论模拟采用啁啾脉冲堆积的方法获得的宽带整形脉冲在光纤中的传输特性, 计算了不同初始相位差无啁啾堆积脉冲波形和不同啁啾堆积脉冲波形随传输长度的演变关系, 对影响堆积脉冲时间传输

**收稿日期**: 2009-01-15; **收到修改稿日期**: 2009-03-17

**基金项目**: 中国工程物理研究院激光聚变研究中心和等离子体物理国家级重点实验室创新基金资助课题。

**作者简介**: 夏彦文(1972—), 男, 博士, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: xiayanwen@gmail.com

特性的因素进行系统评价。

$$D(t, r) = \int_0^{\infty} \epsilon_0(t') E(t - t', r) dt'. \quad (2)$$

## 2 理论模型

波包在线性均匀色散物质中的传输满足波动方程:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t^2} D = 0, \quad (1)$$

其中  $E$  为光脉冲电场强度,  $D$  为电位移。若认为光是线偏振的, 并忽略空间色散, 在非磁性及各向同性物质中电位移与电场强度的关系为

为了得到波包传输的近似方程, 通常采用慢变包络近似, 这样的近似对于处理脉冲长度  $\tau_p \geq 10T_0$  是精确的, 可以处理短至 0.1 ps 的光脉冲<sup>[11]</sup>。由于在光纤中光束的衍射弥散长度远小于色散长度, 可以将传输场进行横向一纵向空间分离。考虑到在单模光纤中传输的本征模为非均匀平面波<sup>[12]</sup>, 因此场具有如下形式:

$$E(t, z) = \frac{1}{2} A(t, z) F(\rho) \exp(\pm im\varphi) \cdot \exp[-i(\omega_0 t - kz)] + c. c., \quad (3)$$

其中  $A$  为脉冲慢变包络函数,  $k$  为传输常数,  $m$  为整数。  $F(\rho)$  为脉冲场横向分布函数, 决定了场的传输模式, 一般有多个特征解, 对应不同的波导模式。脉冲光在光纤中按不同模式传输, 每个模式的传输类似于平面波在无限大色散介质中的传输。考虑到  $A(t - t', z)$  是时间的慢变函数, 将它沿  $t'$  按泰勒级数展开, 然后带入(1)式得本征模的传输方程:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{u} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{i}{2} k_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{i}{2k_0} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \right] A - \frac{1}{2k_0} \sum_{m=3}^{\infty} \frac{i^{m+1}}{m!} \left( \frac{\partial^m k^2}{\partial \omega^m} \right)_{\omega_0} \frac{\partial^m A}{\partial t^m} = 0, \quad (4)$$

其中  $u = [\partial k / \partial \omega]_{\omega_0}^{-1} = c [n - \lambda (\partial n / \partial \lambda)_{\lambda_0}]^{-1}$  为脉冲群速度,  $k_2 = (\partial^2 k / \partial \omega^2)_{\omega_0} = (\partial^2 n / \partial \lambda^2)_{\lambda_0} \lambda_0^2 / 2\pi c^2$  为群速度在一阶近似下的色散,  $k_3 = (\partial^3 k^2 / \partial \omega^3)_{\omega_0} / 2k_0$  为群速度在二阶近似下的色散。在许多情况下(载波为 1  $\mu\text{m}$  处, 甚至对于皮秒、亚皮秒脉冲), 脉冲的传输只考虑到二阶色散理论已足够了。例如对于 1053 nm 亚皮秒量级脉冲在石英光纤中的传输, 二阶色散系数  $k_2 \approx 16 \text{ ps}^2/\text{km}$ , 三阶色散系数  $k_3 \approx 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$ , 相应的衍射长度之比  $\frac{L_D}{L'_D} = (\tau_0^2 / |k_2|) / (2\tau_0^3 / |k_3|) = |k_3| / (2|k_2| \tau_0) \approx 1/32 \ll 1$ 。采用运动坐标系 ( $z = z, \eta = t - z/u$ ), (4)式在二阶色散近似下的解为

$$A(\eta = t - z/u, z) = \int_{-\infty}^{\infty} A_0(t) (-i2\pi k_2 z)^{-1/2} \exp[-i(\eta - t)^2 / (2k_2 z)] dt. \quad (5)$$

采用啁啾脉冲堆积方法获得宽带平顶脉冲, 即将单个几十到几百皮秒的基元啁啾脉冲分成若干个子脉冲, 通过调整延时参数、脉冲数目或振幅大小等方式, 得到纳秒量级不同形状的整形宽带脉冲。假定基元脉冲为线性啁啾高斯脉冲, 堆积脉冲由基元脉冲分裂成  $2N$  束延迟合成构成, 第  $m$  束振幅峰值相对  $t = 0$  时刻的延迟为  $T_m$ , 堆积脉冲具有如下形式:

$$A(\eta, z = 0) = \sum_{m=-N}^N \rho_m \exp \left[ -\frac{1}{2} (1 + iC) \frac{(\eta - T_m)^2}{\tau_0^2} - i\varphi_m \right], \quad (6)$$

其中  $\rho_m$  为子脉冲振幅峰值,  $C$  为频率(相位)啁啾,  $\tau_0$  为基元脉冲半宽度[强度的  $\exp(-1)$ ],  $\varphi_m$  为子脉冲初始相位延迟。方程(5)的传输解为

$$A(\eta, z) = \tau_0 \sum_{m=-N}^N \rho_m (\tau_0^2 + Ck_2 z - ik_2 z)^{-1/2} \exp \left[ -\frac{(1 + iC)(\eta - T_m)^2}{2(\tau_0^2 + Ck_2 z - ik_2 z)} - i\varphi_m \right]. \quad (7)$$

单个子脉冲宽度随传输距离按下式增长:

$$\tau_p(z) = \tau_0 [(1 + Ck_2 z / \tau_0^2)^2 + (k_2 z / \tau_0^2)^2]^{1/2}. \quad (8)$$

采用无量纲表示  $t = \frac{\eta}{\tau_0}, \phi = \omega_0 \tau_0, Z = \frac{z}{L_D} = \frac{k_2}{\tau_0^2} z, T_m = ma\tau_0, \varphi_m = -\omega_0 T_m = -ma\phi, a$  为脉冲间延迟参

数, 传输方程可以表示为

$$A(t, Z) = (1 + CZ - iZ)^{-1/2} \sum_{m=-N}^N \rho_m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(t - ma)^2}{(1 + CZ)^2 + Z^2} - i \left[ \frac{Z(1 + C^2) + C}{(1 + CZ)^2 + Z^2} \frac{(t - ma)^2}{2} - ma\phi \right] \right\}. \quad (9)$$

### 3 数值模拟

假定宽带平顶脉冲由 11 个线性啁啾高斯子脉冲堆积构成,各子脉冲包络幅值  $\rho_m$  相等,啁啾量  $|C|=77$ ,子脉冲间距 ( $T=\tau_0$ ) 近似等于基元子脉冲宽度  $a\approx 1$ 。图 1 给出了初始基元啁啾脉冲及得

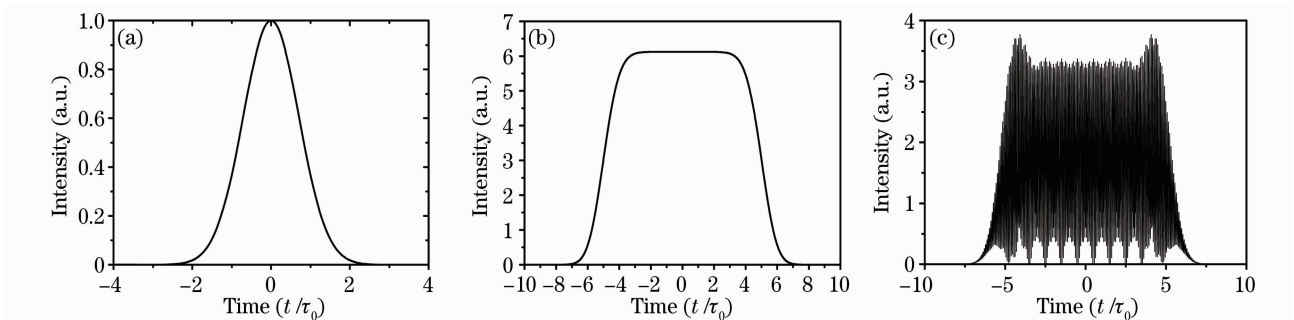


图 1 基元脉冲及堆积脉冲时间波形强度分布。(a) 基元脉冲;(b) 无啁啾堆积脉冲;(c) 啁啾堆积脉冲

Fig. 1 Temporal pulse shape of original and the stacked. (a) Original pulse; (b) unchirped pulse stacking; (c) pulse stacking

在线性传输中,初始堆积脉冲为子脉冲场强的线性叠加,因此经光纤传输后的堆积脉冲仍为各个子脉冲传输后的线性合成。根据啁啾、色散系数的符号及大小,堆积脉冲具有不同的演变形式。图 2 给出  $a\phi=2\pi$  和  $-0.05\pi$  两种情况下初始无啁啾堆积脉冲波形随传输长度的演变关系。根据(9)式可以得到,如果脉冲间距差引入的初始位相差  $a\phi$  是  $\pi$  的整数倍时,脉冲相对于  $t=0$  反演对称,这种性质即使在脉冲传输过程中也保持不变。如果初始相位差偏离  $\pi$  的整数倍,脉冲包络在传输过程中会逐步失去中心对称性,脉冲重心逐步偏离中心;且堆积脉冲数越多,偏离量越大,如图 2(b) 所示。 $a\phi$  处在相位空间的上半平面时( $\pi>a\phi>0$ )脉冲重心向前沿移动,当  $a\phi$  接近  $0.5\pi$  时移动量最大,之后重心向中心

到的堆积脉冲瞬时强度分布。由图 1(c) 可见,由于子脉冲均来自同一基元脉冲,子脉冲间的相位差恒定,因此子脉冲间存在固定的相干效应,出现拍频现象,导致堆积脉冲包络出现周期性“调制”。

回移,在  $a\phi=\pi$  时重心回移到中心,然后完成相反过程,具体结果如图 3 所示。 $|a\phi|$  越接近  $(2n+1)\pi$ ,子脉冲干涉相消越显著,脉冲调制越明显,脉冲平均幅度越低;相反, $|a\phi|$  越接近  $2n\pi$ ,子脉冲干涉加强越显著,脉冲越光滑,脉冲幅度越高。同时由于  $\phi=\omega_0\tau_0$  是一个大量,延迟参数  $a$  的细微变化就会引起初始相位差的显著变化,导致堆积脉冲的包络不稳定(例如对于  $1053\text{ nm}$ ,  $\tau_0=100\text{ ps}$  的基元脉冲堆积,假定子脉冲间延迟  $a\tau_0=\tau_0$ ,  $\phi=\omega_0\tau_0\approx 5\times 10^4\pi$ ,要使子脉冲间的初始位相差变化不超过  $0.1\pi$ ,要求其在真空中的光程差不超过  $0.05$  个波长),因此堆积脉冲的包络演变与子脉冲的载频  $\omega_0$  及子脉冲间的延迟参数  $a\tau_0$  有关。

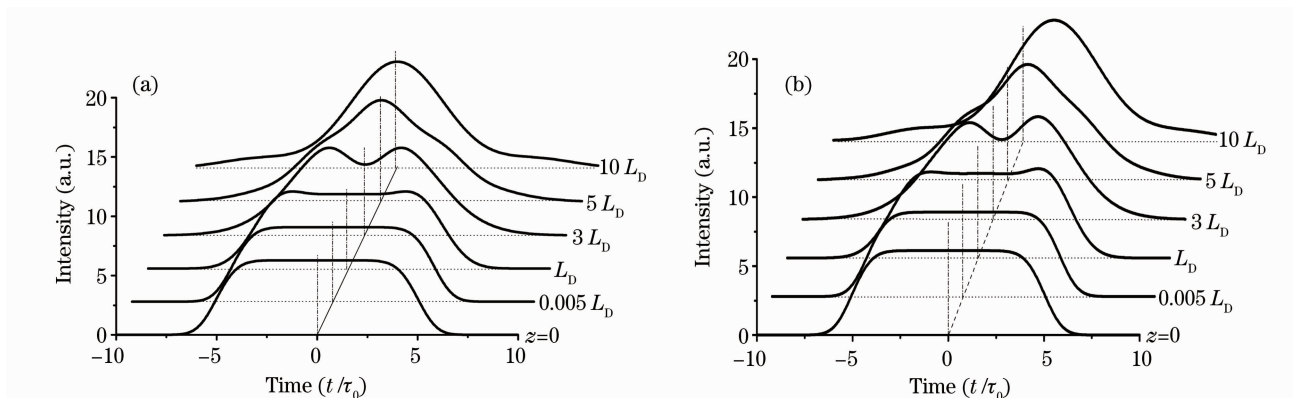


图 2 无啁啾堆积脉冲波形随传输距离的演变。(a)  $a\phi=2\pi$ ;(b)  $a\phi=-0.05\pi$

Fig. 2 Evolution of an unchirped Gaussian pulse stacking along the fiber length. (a)  $a\phi=2\pi$ ; (b)  $a\phi=-0.05\pi$

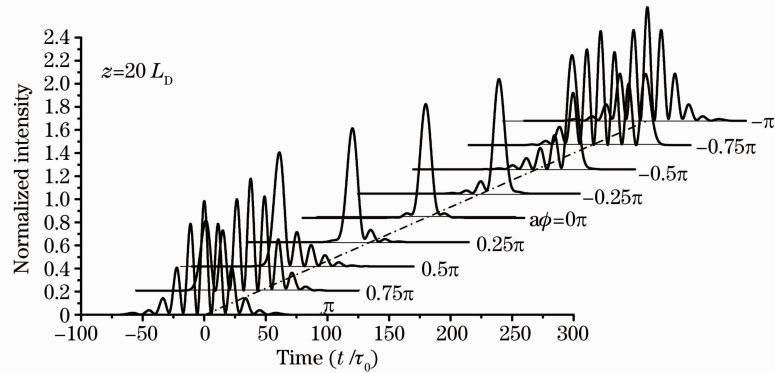


图 3 无啁啾堆积脉冲波形变化与初始相位差的关系

Fig. 3 Variation of pulse shape of an unchirped Gaussian pulse stacking with initial phase difference  $a\phi$

图 4 给出啁啾分别为  $C = 77$  和  $C = -77$  堆积脉冲波形随传输距离的演变,图中 \* 后面的数值表示纵坐标的放大倍率。在短距离传输中堆积脉冲的演变与啁啾有关,当啁啾  $C < 0$  时,子脉冲首先得到压缩,传输到距离约为  $L_D / |C|$  时达到极小值,此时子脉冲变为傅里叶变换极限型,每个子脉冲的幅度增大  $|C|$  倍,堆积脉冲调制深度也最大;当延迟参数  $a$  不是太小时( $a > 2 |C|^{-1}$ ) 演变为子脉冲序列,之后子脉冲相位反向,脉冲逐渐加宽,脉冲序列逐步回复到

堆积状态。啁啾  $C > 0$  时,子脉冲脉宽随传输距离增加而变宽。对于  $|C| \gg 1$  的堆积脉冲,当传输距离  $Z > 1 (z > L_D)$  时,子脉冲的脉宽展宽因子为  $Z \sqrt{1 + C^2}$ ,传输引入的相位因子  $\frac{Z(1 + C^2) + C}{(1 + CZ)^2 + Z^2} \approx \frac{1}{Z}$ ,与  $C$  的符号无关,正、负啁啾堆积脉冲的演变规律趋于一致。这种近似程度越满足,脉冲包络形状越趋于无啁啾堆积脉冲的演变,但啁啾越大,脉冲包络幅度下降越严重。

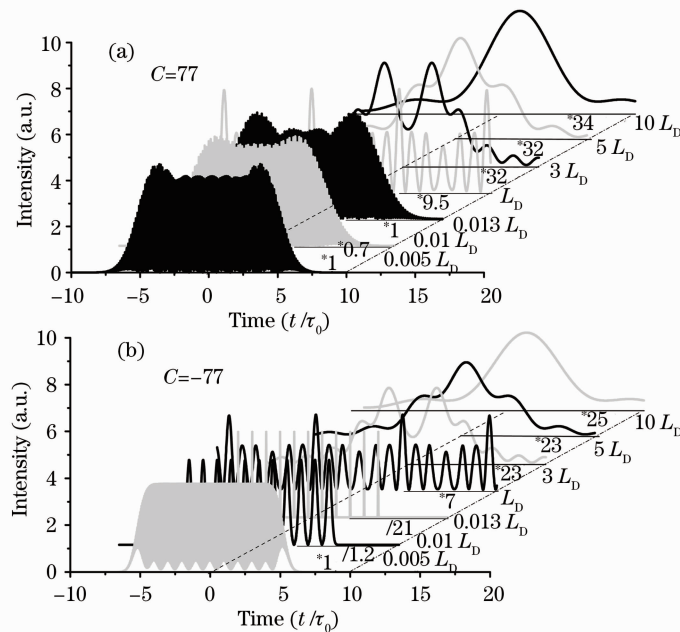


图 4 啁啾堆积脉冲随传输距离的演变。

Fig. 4 Evolution of a chirped Gaussian pulse stacking along the fiber length

不论  $C$  为正或为负,即使在短距离中传输,脉冲包络的调制起伏也很明显。通过与光束的传播作对比可以很好地解释这种现象<sup>[11]</sup>,对于脉冲在正常色散的光纤中传输,啁啾  $C < 0, C > 0, C = 0$  的频率调制器分别类似于正透镜(焦距  $f = L_D / |C| = \tau_0^2 / |Ck_2|$ )、负透

镜和平板。因此啁啾越大、初始脉宽越短、色散系数越大,“时间透镜”的焦距就越短,“时间发散角”就越大,脉冲压缩(加宽)越严重。堆积脉冲类似于“时间平面”上的相干子光束组,整个包络的传输演变由个别脉冲演变相干合成决定。因此整个包络脉冲的特性与子脉冲

的参数(包括载频、脉冲形状、脉宽、啾啾量等)及子脉冲间的延迟参数等都有关系。

## 4 结 论

对啾啾脉冲堆积方法所获得的平顶宽脉冲在光纤中传输特性进行理论模拟,得到了在初始堆积脉冲间距差引入不同初始位相差和不同啾啾量情况下堆积脉冲时间波形传输的演变规律。计算结果表明,脉冲间距差引入的初始延迟参数的细微变化就会引起初始位相差的显著变化,导致堆积脉冲包络相对子脉冲延迟参数不稳定;包络脉冲的特性与子脉冲的载频、脉冲形状、脉宽和啾啾量等子脉冲参数,及子脉冲间的延迟参数等有关,如果啾啾越大、子脉冲初始脉宽越短、传输介质色散系数越大,则堆积脉冲时间调制变得越严重。研究结果为堆积啾啾脉冲波形的精密诊断提供一定的理论依据。

### 参 考 文 献

- 1 J. D. Lindl, W. C. Mead. Two dimensional simulation of fluid instability in laser fusion pellets[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1975, **34**(20): 1273~1276
- 2 S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler *et al.*. Improved laser beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3456~3462
- 3 M. Nakat Suka, N. Miyanaga, T. Kanabe *et al.*. Partially coherent light source for ICF experiment [C]. *SPIE*, 1993, **1870**: 151~162
- 4 S. Mat Suoka, N. Miyanaga, A. Ando *et al.*. Flexible pulse shaping of partially coherent light on GEKKO Ⅲ [C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 627~633
- 5 Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 466~470  
林宏奂,隋展,王建军等.啾啾脉冲堆积用于光脉冲整形[J].*光学学报*, 2007, **27**(3): 466~470
- 6 Zhang Rui, Zhang Xiaomin, Su Jingqin *et al.*. Temporal beam smoothing technique using chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1512~1516  
张锐,张小民,粟敬钦等.采用啾啾脉冲堆积的时间束平滑技术[J].*光学学报*, 2006, **26**(10): 1512~1516
- 7 P. Leclerc, V. Allouche. Temporal response diagnostic for the laser megaJoule[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 843~850
- 8 S. Thomas, B. Boyd, T. Davis Don *et al.*. Temporal multiplexing for economical measurement of power versus time on NIF[C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 700~706
- 9 Xia Yanwen, Ye Jinxiang, Liu Hua *et al.*. Study on the propagation characteristics of ultraviolet picosecond laser pulse in step-index multimode fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(3): 284~288  
夏彦文,叶金祥,刘华等.激光脉冲在阶跃型多模光纤中的传输[J].*强激光与粒子束*, 1999, **11**(3): 284~288
- 10 Xia Yanwen, Sun Zhihong, Tang Jun *et al.*. Propagation characteristics of temporal profile in optical fibers[J]. *Optics and optoelectronic technology*, 2008, **6**(6): 5~8  
夏彦文,孙志红,唐军等.脉冲激光在光纤中时间波形传输特性研究[J].*光学与光电技术*, 2008, **6**(6): 5~8
- 11 S. A. Akhmanov, V. A. Vysloukh, A. S. Chirkin. Optics of femtosecond laser pulses[M]. New York: American institute of physics, 1992
- 12 E. G. Neumann. Single-mode fibers [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 20~30