

版权所有 © 《激光技术》编辑部

文章编号: 1001-3806(2010)02-0197-05

http://www.jgjs.net.cn

红外纳秒激光脉冲在光纤中传输特性研究

夏彦文, 唐 军, 孙志红, 刘 华, 彭志涛, 徐隆波, 傅学军, 元浩宇
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了提高激光时间波形测量系统的抗干扰能力, 建立了激光脉冲在光纤中的传输物理模型, 分析了纳秒脉冲在光纤中的线性传输特性, 对影响脉冲传输特性的因素进行了系统评价。采用空气与光纤传输进行比对的方法, 实验测试了激光脉冲经过不同长度的单模和多模光纤传输后的脉冲波形, 得到脉冲展宽在允许的测量误差范围内所需的阈值条件。结果表明, 该研究对神光-III主机激光脉冲时间波形测量的设计具有重要的意义。

关键词: 光纤光学; 脉冲展宽; 非线性薛定谔方程; 脉冲波形

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.015

Characteristics of infrared nanosecond pulse propagating in optical fibers

XIA Yan-wen, TANG Jun, SUN Zhi-hong, LIU Hua, PENG Zhi-tao, XU Long-bo, FU Xue-jun, YUAN Hao-yu
(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: For the propose of improving the anti-jamming ability of a laser pulse shape measuring system, the laser pulse propagation model was established, the linear characteristics of a nanosecond pulse propagating in fibers were analyzed, and factors affecting the pulse transmission characteristics were evaluated systematically. The laser pulse shape was measured with a nanosecond laser pulse propagating through single and multi-mold fiber in different length. The width of the pulse transmitted by the fiber was compared to that of a fraction of the pulse propagating over an air path. The critical condition of pulse broadening acceptable within measuring error was obtained. The conclusion provides guidance to design the laser pulse shape measuring system of the SG-III laser facility

Key words: fiber optics; pulse broadening; nonlinear Schrödinger equation; pulse shape

引 言

随着神光-III原型装置的建立及神光-III主机的研制, 要求测量脉冲时间波形的激光束数按量级增长, 多束数、多诊断点是激光参量诊断系统必须解决的难题。采用光纤作传输介质可以大幅降低成本、提高诊断系统的抗干扰能力。在激光聚变领域, 法国 Commissariat à l'énergie Atomique 实验室和美国利弗莫尔国家实验室在国家点火装置的概念设计中都曾经进行过光纤传输测试^[1-3]。国内针对高功率激光脉冲的光纤时间传输特性的研究不多^[4-8]。该研究对神光-III主机激光参量诊断系统的相关研究具有极为重要的意义。

针对神光-III装置激光参量诊断的特点(脉冲展宽不大于 50ps), 建立了激光脉冲在光纤中的传输物理

模型, 分析了脉冲在光纤中的线性传输特性, 对影响脉冲传输特性的因素进行系统评价。采用空气与光纤传输进行比对的方法, 实验测试了激光脉冲经过不同长度的单模和多模光纤传输后的脉冲波形, 得到脉冲展宽在允许的测量误差范围内所需的阈值条件。

1 理 论

光波包在线性色散介质中的传输符合经典光学理论, 满足波动方程:

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

式中, E 为光脉冲电场强度, D 为电位移, c 是真空中光速。这里认为光是线偏振的(不考虑偏振模色散的影响^[9])且沿 z 方向传输, 如果忽略空间色散, 那么在非磁性各向同性物质中电位移与电场强度的关系为:

$$D(t, z) = \int_0^\infty \varepsilon_0(t') E(t-t', z) dt' \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_0(t')$ 是电常数; t 为固定时刻; t' 为时刻, 表示积分变量。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 $\tau_p \geq 10T_0$ (T_0 为光波振荡周期) 是精确的。因此, 这种近似方法

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目 (9140C6803020703)

作者简介: 夏彦文(1972-), 男, 博士, 主要从事光检测技术的研究。

E-mail: xiayanwen@gmail.com

收稿日期: 2008-12-26; 收到修改稿日期: 2009-06-25

可以处理短至 0.1 ps 的光脉冲^[10]。

对于对称型光纤,由于光纤的轴对称结构,一般选取柱坐标 (ρ, φ, z) ,假定光沿 z 轴传输,认为折射率分布与 z 轴无关。电场和磁场的横向分量 $E_\rho, E_\varphi, H_\rho, H_\varphi$ 可以通过纵向电场分量 E_z 表述。在光纤中,光束的衍射长度 $L_{diff} (= k_0 a_0^2, k_0$ 为波数, a_0 为光纤芯径)远远小于发生显著色散现象需要的传输长度,即色散长度 $L_d (= \tau_p^2 / |k_2|, k_2$ 为群速度 1 阶色散系数),可以将传输场进行横向-纵向空间分离。由于在光纤中传输的本征模为非均匀平面波^[11],因此场具有如下形式:

$$E(t, z) = \frac{1}{2} A(t, z) F(\rho) e^{\pm i m \varphi} e^{-i(\omega_0 t - k z)} + c. c. \quad (3)$$

式中, A 为脉冲慢变包络, k 为传输常数, m 是整数, ω_0 是电磁波的中心圆频率, $c. c.$ 表示复共轭项。光纤的横向分布 $F(\rho)$ 一般有多个解,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(略去非实质的横向变化部分 $F(\rho)$),得:

$$D(t, z) = \frac{1}{2} \left\{ \varepsilon_0(\omega_0) A + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{i^m}{m!} \left[\frac{\partial^m \varepsilon_0(\omega)}{\partial \omega^m} \right]_{\omega_0} \frac{\partial^m A}{\partial t^m} \right\} \times e^{-i \omega_0 t - k_0 z} + c. c. \quad (4)$$

式中, $\varepsilon_0(\omega_0) = \int_0^{\infty} \varepsilon_0(t) e^{-i \omega_0 t} dt$, ω 是电磁波的圆频率。将(4)式代入(1)式,得到下面的复振幅方程^[10]:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{u} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{i}{2} k_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{i}{2 k_0} \left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \right\} A - \frac{1}{2 k_0} \sum_{m=3}^{\infty} \frac{i^{m+1}}{m!} \left[\frac{\partial^m k^2}{\partial \omega^m} \right]_{\omega_0} \frac{\partial^m A}{\partial t^m} = 0 \quad (5)$$

式中, $u = \left[\left(\frac{\partial k}{\partial \omega} \right)_{\omega_0} \right]^{-1}$ 为脉冲群速度,群速度 1 阶色散

系数 $k_2 = \left(\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right)_{\omega_0}$,群速度 2 阶色散系数 $k_3 = \frac{1}{2 k_0} \times \left(\frac{\partial^3 k^2}{\partial \omega^3} \right)_{\omega_0}$ 。

脉冲在石英光纤中传输,非线性效应引起的感生折射率远远小于线性折射率,非线性效应的作用不会改变场的横向结构 $F(\rho)$;同时对于短距离(小于 1 km)、长脉冲(远大于 1 ps)传输,只考虑到群速度 1 阶色散已足够了,得非线性传输方程^[10]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{u} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{i}{2} k_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} \right) A = i \gamma |A|^2 A \quad (6)$$

式中, γ 为非线性系数, α 为非共振衰减系数。引入归一化时间 $\tau = \frac{t - z/u}{T_0}$ 及归一化振幅 $U(z, \tau) = \frac{A(z, \tau)}{\sqrt{P_0}} \times \exp(\alpha z/2)$,在行波表象中,该方程简化为:

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\text{sgn}(k_2)}{2 L_d} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - \frac{\exp(-\alpha z)}{L_{NL}} |U|^2 U \quad (7)$$

式中, P_0 为初始峰值功率, $L_{NL} = 1/(\gamma P_0)$ 为非线性作用长度, $\text{sgn}(k_2) = \pm 1$ 为符号函数,当 k_2 为正时取 1。从(7)式可以看出,在单模光纤中要使脉冲不失真,方程右边的各项必须尽可能小,传输距离 L 应满足条件: $L \ll L_{NL}, L \ll L_d$ 。

为了对光纤的材料色散效应进行评价,一般以确定形状的脉冲为入射条件,在不同的条件下的解见有关文献^[10,12]。图 1 中给出了纯石英玻璃的相关参量(实际光纤由于各种原因掺有少量杂质,相关参量稍有偏差),图 2 中给出了亚皮秒无啁啾高斯脉冲在纯石英玻璃中的线性传输演变。因此,对啁啾不大的纳

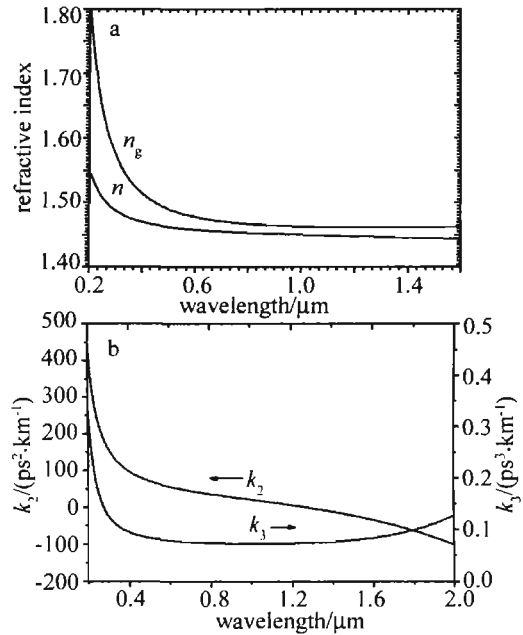


Fig. 1 Variation of refractive index n and group index n_g , and variation of parameters k_2, k_3 , with wavelength for fused silica

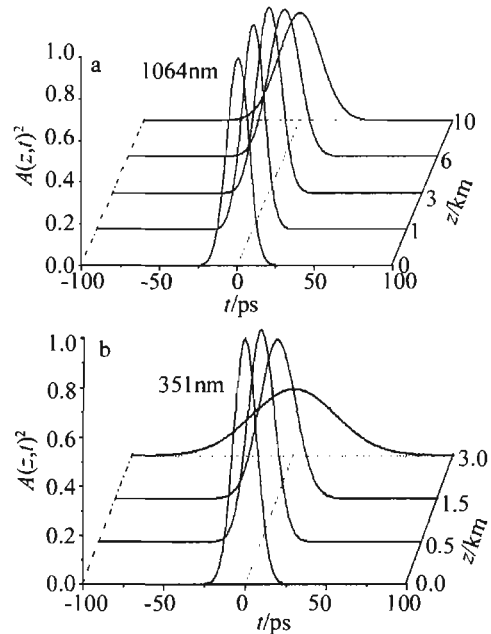


Fig. 2 Dispersion-induced broadening of a sub-picosecond Gaussian pulse inside a fused silica fiber

秒脉冲在短距离的光纤传输中可以不考虑色散的影响。但在色散和非线性效应的共同作用下,即使色散量很小,脉冲改变也很显著。由于在波长 1053nm 附近石英材料属正常色散,与自相位调制 (self-phase modulation, SPM) 同号,导致脉冲加宽更快(针对无啁啾脉冲)。因此实际应用时应尽量降低传输脉冲的峰值功率,采用高灵敏度的探测器探测,减小非线性效应的影响。

2 实验及结果分析

脉冲无畸变传输必须满足阈值条件: $L \ll L_{NL}$, $L \ll L_d$ 。前者确定了探测器的灵敏度,后者决定了光纤的类型。传输实验排布见图 3,类似于参考文献 [6],不同之处在于将耦合光纤改为一分二的分束器: Nd: YLF 激光器传输的脉冲经衰减后聚焦在一分二的分束光纤前端面,一束不经延迟,另一束经待测光纤传输后进入同一快平面二极管分别表征传输光纤的输入、输出脉冲,通过比对的方法可以确定光纤的传输特性。

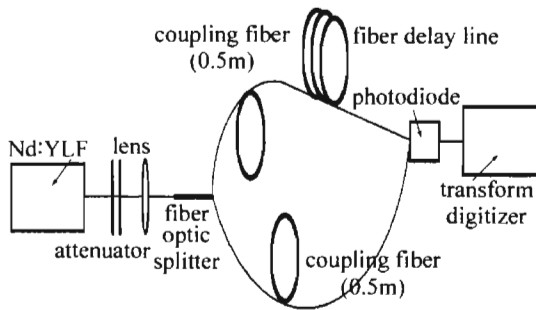


Fig. 3 Experimental setup

为了研究光纤的色散特性,还选用了更短的皮秒光纤激光器: 输出重复脉冲宽度约 100ps, 脉冲功率约 100mW。

为了准确得到传输光纤的输入、输出脉冲功率,必须要知道分束器的分光比及探测系统的灵敏度。首先将光纤分束器出来的光引入同一个光电探测器,由 20GHz 采样率的高速数字示波器记录,通过时分复用的方法标定出两束光的分光比,然后将其中一束引入进微能量计进行能量检测。假定在同一个光电探测器上光束 1 的幅度为 n_1 , 光束 2 的幅度为 n_2 , 两束光的分光比为 n_1/n_2 。如果光束 1 在微能量计上的能量值为 m , 光束 2 在光电探测系统上的幅度为 n_3 , 那么探测系统的灵敏度为 $mn_2/(n_1n_3)$ 。图 4 中给出了某快响应二极管的灵敏度测试结果。由图知, 两束光的分光比为 0.591:1, 相对灵敏度为 50pJ/V。由此可以推算待测系统的灵敏度为 $0.591 \times 50 = 30\text{pJ/V}$ 。

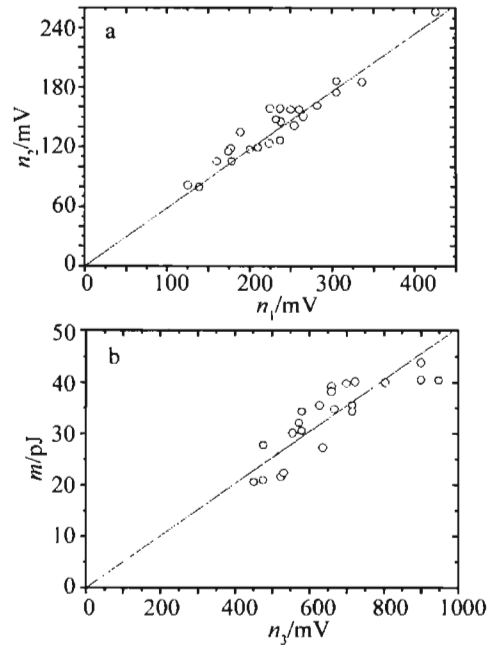


Fig. 4 Sensitivity testing of a rapid response photodiode
a—the optical dividing ratio of fiber optic splitter b—the ratio of the reading of calorimeter to that of photodiode

实验中采用了多类光纤: 渐变折射率多模通讯光纤(芯径/包径 = 62.5 μm / 125 μm); 纯石英阶跃型通讯光纤(芯径 9 μm , 损耗 0.17dB/km)、两种单模光纤(中心波长 1.053 μm , 损耗 10dB/km 及 0.17dB/km)。实验结果分别见图 5 ~ 图 7。

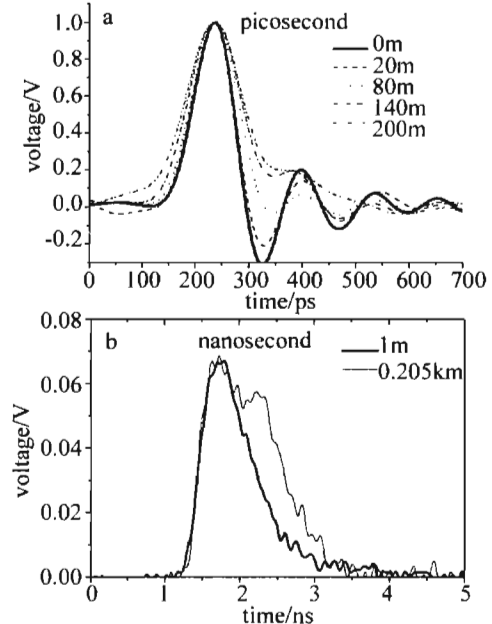


Fig. 5 Temporal evolution of picosecond and nanosecond pulse in gradual-index fiber

渐变抛物型多模光纤的模式间群时延差可近似表示为 $\Delta\tau = 0.5n_1\Delta^2 < 0.1\text{ps/m}$, Δ 表示光纤纤芯与包层的相对折射率差。但实际上测试波长不是 1.55 μm 而是约 1 μm , 模式分布及脉冲响应在很大程度上与光源及输入-输出耦合器件有关。这时群时延差的近似公

式不适用,实际测得的时延差要大得多,随着传输距离加大脉冲后沿变宽(见图5)。

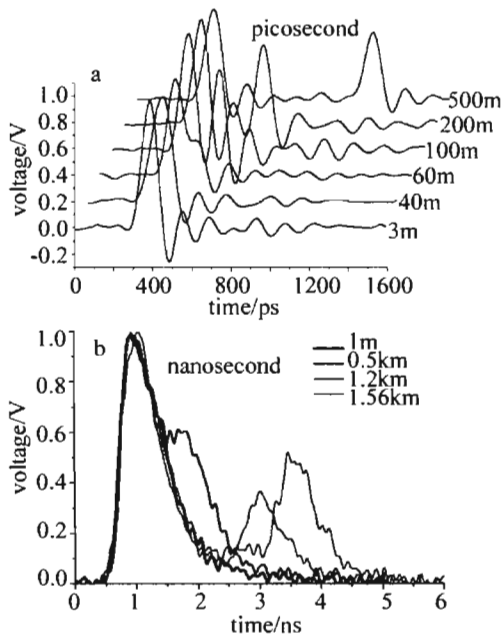


Fig. 6 Temporal evolution of picosecond and nanosecond pulse in the $9\mu\text{m}$ -core fused silica fiber

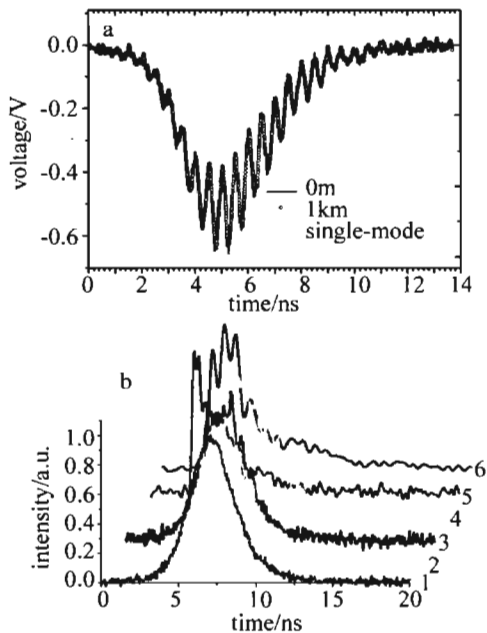


Fig. 7 a—temporal evolution of 1053nm nanosecond pulse in 1km-length $6\mu\text{m}$ -core single mode fiber b—shape of a $1.053\mu\text{m}$ nanosecond pulse for different values of intensity

实验中选用的芯径 $9\mu\text{m}$ 的纯石英光纤为多模阶跃型,最终的输出脉冲为多个模式的耦合叠加^[10],因此引起脉冲畸变的主要因素不是模内色散,而是模间色散,这可由图6明显看出。脉冲经光纤传输后产生两个脉冲,脉冲间距随光纤长度呈线性增长,脉冲间的传输速度差约为 $1.6\text{ns}/\text{km}$,在传输 1km 后出现第2次分叉,速度差约为 $150\text{ps}/\text{km}$,由此可以判断,该光纤主要传输 LP_{01} , LP_{11} 模。由于该光纤能传输的模式不多,通过仔细调节光纤的耦合输入端可

以抑制高阶模激发,在短距离(传输距离小于 200m)、低功率传输下可以得到不失真信号。但由于高功率激光经长距离传输后,很难保证光束的指向性,难以抑制高阶模激发,因此,经长距离传输后出现分离脉冲结构的几率很高。

图7a为 1053nm 纳秒脉冲经 1km 、纤芯 $6\mu\text{m}$ 的单模光纤传输后的典型纳秒脉冲时间波形,采用灵敏度为 $20\text{pJ}/\text{V}$ 的红外快响应管探测,在示波器量程范围内脉冲不失真。图7b为不同功率的脉冲经光纤传输后的时间波形,采用低灵敏度 ($180\text{nJ}/\text{V}$) 的红外快响应管探测。图7b中1为光纤输入波形,从2到6输入功率逐渐增强(输出幅度 50mV , 100mV , 200mV , 500mV , 2V)。

对纯石英材料,计算表明在波长 1.053nm 处光纤带来的材料色散 $D_m(\lambda)$ ($= -2\pi k_2/\lambda^2$) 约为 $27\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ (见图1),波导色散 $D_w(\lambda)$ 与归一化频率 ν 有关。在 $\nu=2.4$ 、相对折射率差 $\Delta\approx 0.5\%$ 的情况下约为 $5\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 。因此,根据光纤的线性传输理论,对于通常的纳秒量级脉冲,当光纤长度在 1km 内,完全可以忽略模内色散效应对脉冲的影响(见图2)。国产 $1.053\mu\text{m}$ 的单模光纤在传输 1.2km 后没有观察到脉冲畸变,且对光纤的耦合方式不灵敏,缺点是传输损耗较大 ($10\text{dB}/\text{km}$),同样国外产的芯径 $6\mu\text{m}$ 的单模光纤没有观察到由线性色散引起的脉冲畸变(见图7)。然而,如果传输功率较高,由于非线性效应脉冲会失真。对于现有实验条件,激光入射脉冲长度 $\tau_p\approx 1\text{ns}$ (或者 150ps),群速度色散参量 $\beta_2\approx 16\text{ps}^2/\text{km}$,非线性系数近似取 $\gamma=2.5\text{W}^{-1}/\text{km}$,如果采用灵敏度为 $20\text{pJ}/\text{V}$ 的红外快响应管探测,入射功率要求为 10mW 量级,计算得 $4\text{km}<L_{\text{NL}}\ll L_d$,短距离传输不会带来显著的失真。相反,如果采用灵敏度低 ($180\text{nJ}/\text{V}$) 的红外快响应管,在正常探测幅度下入射功率要求达瓦级,计算得 $40\text{m}<L_{\text{NL}}\ll L_d$,经几百米传输后脉冲会发生显著失真,实验结果见图7b。

3 结论

建立了激光脉冲在光纤中的传输物理模型,分析了脉冲在光纤中的线性传输特性,对影响脉冲时间传输特性的因素进行系统评价。采用空气与光纤传输进行比对的方法,实验测试了红外激光脉冲(纳秒级、小啁啾)经过不同长度的单模和多模光纤传输后的脉冲波形,得到脉冲展宽在允许的测量误差范围内所需的阈值条件和设计原则,研制的红外脉冲时间波形取样光纤样件可用于神光III主机装置参量测量系统的工程设计。

参 考 文 献

- [1] LECLERC P, ALLOUCHE V. Temporal response diagnostic for the Laser Megajoule[J]. SPIE, 1999, 3492: 843-850.
- [2] THOMAS S, BOYD B, DAVIS D T, *et al.* Temporal multiplexing for economical measurement of power versus time on NIF[J]. SPIE, 1997,3047:700-706.
- [3] MILAM D, THOMPSON C, SELL W, *et al.* Measurements at 351 nm of temporal dispersion in fibers[R]. Livermore; University of California, Radiation Laboratory,1998;1-24.
- [4] ZHU Q Ch, WU F Ch, SHI A Y. A new UV optical fiber with wide bandwidth[J]. Journal of Dalian university of Technology,1997, 37 (s2):217-218(in Chinese).
- [5] XIA Y W, YE J X, LIU H, *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(in Chinese).
- [6] XIA Y W, SUN Zh H, TANG J, *et al.* Propagation characteristics of temporal profile in optical fibers[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008,6(6): 5-8(in Chinese).
- [7] XU L B, LIU H, PENG Zh T, *et al.* Experimental research on pulse-shape measurement of high power laser with the use of fiber sampling techniques[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(3): 35-37(in Chinese).
- [8] SONG Y, WANG L. Effect of fiber dispersion on pulse width[J]. Laser Technology, 2008, 32(6):568-571 (in Chinese).
- [9] WANG C, LI K, KONG F M. Study of characteristics of polarization mode dispersion in single mode fibers with elliptical birefringence [J]. Laser Technology,2006,30(5):465-468 (in Chinese)
- [10] AKHMANOV S A, VYSLOUKH V A, CHIRKIN A S. Optics of femtosecond laser pulses[M]. New York: American Institute of Physics,1992:9-14.
- [11] NEUMANN E G. Single-mode fibers[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988:20-30.
- [12] ACRAWAL G P. Nonlinear fiber optics[M]. Boston: Academic Press, 1989:15-20.
- [13] LI H M, ZHANG Q H, TANG Y, *et al.* GB/T 22400-2008,rapid determination of melamine in raw milk High performance liquid chromatography method [EB/OL]. [2009-01-09]. http://220.181.176.160/stdlinfo/servlet/com.sac.sacQuery.GjbzcxDetailServlet?std_code=GB/T%2022400-2008(in Chinese).
- [14] XU J G, WANG Z B. Analysis method of fluorescence[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press,2006:137-139(in Chinese).
- [15] ZOU B F, ZHANG Y Ch, HU Sh X. Study on the design of measuring organic aerosol fluorescence lidar[J]. Laser Technology,2008, 32(3):287-289(in Chinese).
- [16] MA Y G, ZHU Ch Y, HE M X, *et al.* The experimental study about the diffusivities of amino acids in aqueous solution[J]. Laser Technology,2005, 29(2):145-147(in Chinese).

(上接第 196 页)