

文章编号: 1001-3806(2010)06-0781-04

## 光子晶体光纤中基于交叉相位调制的脉冲压缩

李爱萍<sup>1,2</sup>, 王安全<sup>1</sup>, 纪延俊<sup>1</sup>

(1. 滨州学院 物理与电子科学系, 滨州 566037; 2. 滨州学院 理论物理研究所, 滨州 566037)

**摘要:** 为了研究飞秒双脉冲在光子晶体光纤不同色散区的非线性传输过程, 采用分步傅里叶方法求解耦合的非线性薛定谔方程组, 并进行了理论分析。讨论了不同抽运功率、不同抽运脉冲啾啾参量以及不同脉宽比对信号脉冲压缩的影响。结果表明, 基于交叉相位调制效应, 弱信号脉冲不仅能够被压缩, 而且光纤存在最佳压缩长度。增大抽运脉冲输入功率, 选取正啾啾抽运脉冲, 可以得到更大的信号脉冲压缩因子, 同时最佳光纤长度减小。另外, 不同的脉冲宽度对信号脉冲的压缩产生大的影响, 较窄脉宽的抽运脉冲易于产生较短的压缩信号脉冲。这一结果对用光子晶体光纤压缩弱信号脉冲提供了理论参考。

**关键词:** 非线性光学; 光子晶体光纤; 分步傅里叶方法; 交叉相位调制; 脉冲压缩

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.017

### Soliton-effect compression due to cross-phase modulation in photonic crystal fibers

LI Ai-ping<sup>1,2</sup>, WANG An-quan<sup>1</sup>, JI Yan-jun<sup>1</sup>

(1. Department of Physics, Binzhou University, Binzhou 256603, China; 2. Institute for Theoretical Physics, Binzhou University, Binzhou 256603, China)

**Abstract:** Based on both the coupled nonlinear Schrödinger equations, the nonlinear propagation of two femtosecond laser pulses in the different regimes of photonic crystal fibers was solved by solving the equation group with the slip-step Fourier method. The effect of the pump pulse power, pump frequency chirp and various pulse widths on signal pulse compression was discussed in detail. The numerical results show that the signal pulse can be compressed through cross-phase modulation and the optimum fiber length can be obtained. It is also found that the compression factor increases with initial positive chirp and power, however, the optimum fiber length decreases. In order to obtain larger compression factor, pump pulses with narrow pulse-width are desirable selected. These results offer theoretical references for weak signal pulse compression by using photonic crystal fibers.

**Key words:** nonlinear optics; photonic crystal fiber; slip-step Fourier method; cross-phase modulation; pulse compression

## 引言

当两个光脉冲在光纤中传输时, 一个光波的相位除受到自身光强的调制外, 还同时受到另一光波光强的调制, 这一现象被称为交叉相位调制 (cross phase modulation, XPM)。交叉相位调制的一个主要的应用是用于产生压缩脉冲。XPM 产生脉冲压缩的一个明显的优点是, 它不像自相位调制 (self phase modulation, SPM) 技术那样需要入射脉冲有较高的强度和能量。XPM 可压缩弱入射脉冲, 因为频率啾啾是由共同传输的强抽运脉冲产生的<sup>[1]</sup>。

光子晶体光纤<sup>[2]</sup>的概念最早由 RUSSELL 等人于 1992 年提出, 即在石英光纤中沿着轴向均匀排列着波长量级空气孔。从光纤的端面看, 折射率存在周期的 2 维结构。这种微结构从根本上改变了传统光纤的许多传输特性, 获得了传统光纤所没有的各种新的特性, 包括无休止单模特性<sup>[3]</sup>、可控的色散特性<sup>[4-5]</sup>以及增强的非线性特性<sup>[6]</sup>。超短激光脉冲在光子晶体光纤中的传输及其相互作用的研究, 已成为当前国际上的热点研究领域, 其中, 对于单脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输及其相互作用, 目前已有大量的研究<sup>[7-12]</sup>, 但对于双脉冲的情况, 研究的较少<sup>[13-16]</sup>。

作者研究了两个不同中心波长的超短光脉冲在光子晶体光纤中传输时相互作用的情形, 发现交叉相位调制效应对信号脉冲压缩产生重要影响, 详细计算和分析了抽运脉冲峰值功率, 抽运脉冲啾啾及脉冲宽度

作者简介: 李爱萍 (1982-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为光子晶体光纤非线性特性。

E-mail: liaiping888@163.com

收稿日期: 2010-01-27; 收到修改稿日期: 2010-03-16

比对信号脉冲各压缩量的影响。

## 1 理论模型及初始输入条件

为研究超短双脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输,作者采用分布傅里叶算法数值求解了耦合的非线性薛定谔方程<sup>[17]</sup>:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{21} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{\alpha_1}{2} A_1 = i\gamma_1 \left[ |A_1|^2 + 2|A_2|^2 - T_R \frac{\partial |A_1|^2}{\partial t} \right] A_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{22} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{\alpha_2}{2} A_2 = i\gamma_2 \left[ |A_2|^2 + 2|A_1|^2 - T_R \frac{\partial |A_2|^2}{\partial t} \right] A_2 \quad (2)$$

式中,  $A_j (j=1,2)$  表示脉冲包络复振幅,  $z$  表示脉冲传输距离,  $t$  表示脉冲传输时间,  $d_j$  为衰减系数,  $v_{gj}$  表示脉冲群速度,  $\beta_{2j}$  表示群速度色散 (group velocity dispersion, GVD) 系数,  $\gamma_j$  为非线性系数, 其定义为  $\gamma_j = n_2 \omega_j / (c A_{\text{eff}})$  ( $j=1,2$ ), 其中  $c$  为光速,  $n_2$  为非线性折射率系数,  $A_{\text{eff}}$  为纤芯的有效面积,  $T_R$  为喇曼脉宽,  $\omega_j$  为中心频率, 在上述方程中, 假定两光波的  $A_{\text{eff}}$  相等。两式等号左边的第3项表示各脉冲 GVD 效应, 等号右边的第1和第2项分别表示各脉冲的 SPM 效应和由于另一脉冲存在而引起的 XPM 效应。为方便起见, 设脉冲1为抽运脉冲; 脉冲2为信号脉冲。在忽略光纤损耗的情况下, 选取时间随抽运脉冲移动的坐标系并作变换:

$$\tau = \left( t - \frac{z}{v_{g1}} \right) / T_{01}, \xi = \frac{z |\beta_{21}|}{T_{01}^2}, U_j = \frac{A_j}{\sqrt{P_1}} \quad (3)$$

则(1)式、(2)式的归一化形式为:

$$\frac{\partial U_1}{\partial \xi} + \frac{i}{2} \text{sgn}(\beta_{21}) \frac{\partial^2 U_1}{\partial \tau^2} = iN^2 \times \left[ |U_1|^2 + 2|U_2|^2 - \tau_R \frac{\partial |U_1|^2}{\partial \tau} \right] U_1 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial \xi} + \delta \frac{\partial U_2}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{22}}{|\beta_{21}|} \frac{\partial^2 U_2}{\partial \tau^2} = iN^2 \frac{\omega_2}{\omega_1} \left[ |U_2|^2 + 2|U_1|^2 - \tau_R \frac{\partial |U_2|^2}{\partial \tau} \right] U_2 \quad (5)$$

式中,  $N = \sqrt{\gamma_1 P_1 T_{01}^2 / |\beta_{21}|}$ , 是抽运脉冲的孤子阶数。  $P_1$  为抽运脉冲的初始峰值功率;  $T_{01}$  为抽运脉冲的初始半峰全宽; 归一化离散参量  $\delta = \text{sgn}(n_{g1} - n_{g2}) \frac{L_d}{L_w}$ , 其中,  $L_d = T_{01}^2 / |\beta_{21}|$  为抽运脉冲的色散长度;  $L_w = T_{01} v_{g1} v_{g2} / |v_{g1} - v_{g2}| = T_{01} / |d|$  表示因两脉冲群速度不等而引起的走离长度, 其中  $d = \frac{v_{g1} - v_{g2}}{v_{g1} v_{g2}}$ ,  $\tau_R = \frac{T_R}{T_{01}}$  为归一化脉冲

喇曼参量, 其中,  $T_R = 5\text{fs}$ ,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为抽运脉冲和信号脉冲的中心频率。作者选取位于反常色散区的高斯脉冲作为抽运脉冲来研究位于正常色散区的双曲正割脉冲的传输特性。并选取初始输入条件为:

$$U_1(0, \tau) = \exp\left(-\frac{1+iC}{2} \tau^2\right) \quad (6)$$

$$U_2(0, \tau) = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \text{sech}\left(\frac{T_{01}}{T_{02}} \tau\right) \quad (7)$$

式中,  $C$  为高斯脉冲的初始啁啾参量, 对  $C > 0$ , 从前沿到后沿瞬时频率线性增加 (上或正啁啾); 对  $C < 0$ , 则正好相反 (下或负啁啾)。  $T_{02}$  为信号脉冲的初始半峰全宽,  $P_2$  为信号脉冲的入射峰值功率, 信号脉冲的孤子阶数  $N_2 = \gamma_2 P_2 T_{02}^2 / |\beta_{22}|$ 。

## 2 计算结果和分析

在数值计算中, 采用零色散波长为  $\lambda_d = 767\text{nm}$  的光子晶体光纤, 并假设信号脉冲 (弱脉冲) 波长  $\lambda_2 = 740\text{nm}$ , 抽运脉冲的波长  $\lambda_1 = 800\text{nm}$ , 对于处于反常色散区的抽运脉冲: 非线性系数  $\gamma_1 = 0.075 \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\beta_{21} = -5.9998 \times 10^{-6} \text{fs}^2/\text{nm}$ ,  $T_{01} = 100\text{fs}$ ; 对于正常色散区的信号脉冲:  $\gamma_2 = 0.081 \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\beta_{22} = 4.9731 \times 10^{-6} \text{fs}^2/\text{nm}$ ,  $T_{02} = 100\text{fs}$ 。由于两脉冲波长差异很小, 因而在较短的传输距离内可忽略信号脉冲与抽运脉冲之间的走离效应, 即  $\delta = 0$ 。除非特别说明, 后面的计算都采用以上参量来进行。

### 2.1 抽运脉冲初始峰值功率对信号脉冲压缩的影响

图1a中给出了当  $N = 5, N_2 = 0.01$  时, 信号脉冲

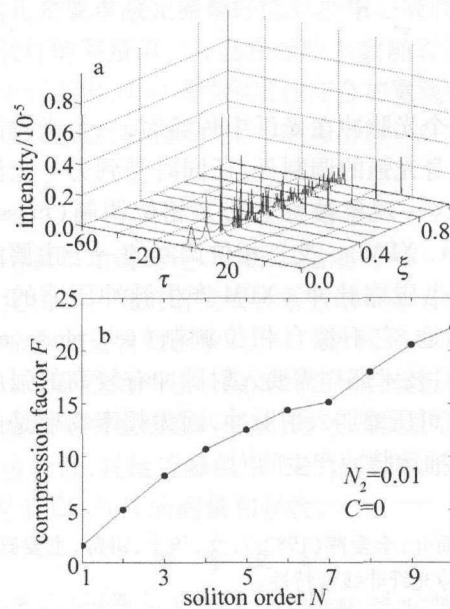


Fig. 1 a—temporal evolution of the signal pulse for the case  $N = 5, N_2 = 0.01, C = 0, T_{01} = T_{02}$  b—variation of compression factor  $F$  with the soliton order  $N$  for the case  $N_2 = 0.01, C = 0, T_{01} = T_{02}$

的演化情况。从图中可以看出,信号光脉冲在传输过程中峰值增强,脉宽变短,当传输到一定距离后,脉冲出现较宽的底部,脉冲展宽,压缩比降低,脉冲压缩存在最佳光纤长度  $\xi_{opt} = 0.1428L_d$ 。为了研究抽运功率对信号脉冲压缩的影响,选取了不同孤子阶数的无啁啾抽运脉冲进行了数值模拟。图1b是  $N_2 = 0.01$ ,  $N$  从1变化到10时,信号脉冲的最佳压缩比  $F$  随抽运脉冲孤子阶数的变化曲线。从图中可以看出,当抽运脉冲功率增大时,信号脉冲可获得更大的压缩,压缩因子与孤子阶数近似呈线性关系。

### 2.2 抽运脉冲啁啾对信号脉冲压缩的影响

实际中,激光器输出的脉冲往往带有啁啾,因而有必要考虑啁啾抽运脉冲对信号脉冲压缩的影响。对抽运脉冲不同啁啾参量下,信号脉冲传输特性进行了大量的数值计算,结果表明,抽运脉冲的啁啾参量对信号脉冲压缩产生了较大的影响。负的啁啾抽运脉冲难以获得高压缩比的信号光脉冲,最佳压缩光纤长度相应延长;正的啁啾脉冲不仅能够得到高压缩比的光脉冲,而且最佳光纤长度变短。初始啁啾对于脉冲压缩因子和最佳光纤长度的影响如图2所示。当抽运啁啾  $C$

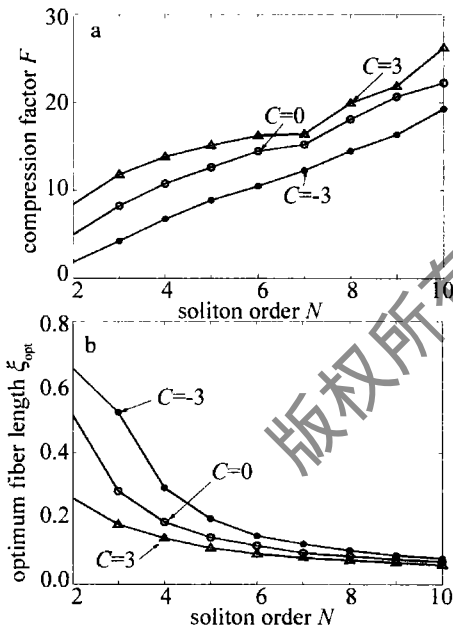


Fig. 2 Variation of compression factor  $F$  and the optimum fiber length  $\xi_{opt}$  for the case  $N_2 = 0.01, C = 0, T_{01} = T_{02}$  with the soliton order  $N$

分别为  $-3, 0, 3$  时,通过改变抽运脉冲的孤子阶数分析信号压缩因子和最佳光纤长度的变化。从图3a中可以看出,正啁啾  $C = 3$  更有利于脉冲的压缩,信号脉冲可以得到更大的压缩,且最佳光纤长度较短,如图3b所示。随着峰值功率的增大,压缩因子也逐渐增大,最佳光纤长度逐渐减小。抽运脉冲啁啾对信号脉冲的影响可以这样来解释:当抽运脉冲具有正啁啾时,正啁啾对中心波长处于反常色散区的抽运脉冲展宽具

有补偿作用,使信号脉冲比抽运脉冲无啁啾时产生更大的正啁啾,因而其压缩因子提高,最佳压缩光纤长度变短。当抽运脉冲啁啾为负时,负啁啾使得中心波长处于光纤反常色散区的抽运脉冲展宽加快,因此,通过交叉相位调制施加给信号脉冲中心部分的线性正啁啾比抽运脉冲无啁啾时的要小,从而使其获得的压缩比降低,最佳压缩光纤长度变长。

### 2.3 不同脉宽比对信号脉冲压缩的影响

一般情况下,抽运脉冲和信号脉冲的脉冲宽度是不相等的。因而,研究两脉冲不同脉宽时,由于交叉相位调制效应而对信号光压缩的影响有现实意义。为了研究方便,通过改变两脉冲初始脉宽的比值,对信号脉冲的演化情况进行了一系列数值计算。图3中给出了  $N = 5, N_2 = 0.01, C = 0$  时,对应不同初始脉宽比  $T_{02}/T_{01}$  分别为  $0.5, 1, 1.5$  条件下,信号脉冲的压缩因子随传输距离的变化曲线(如图3a所示)和信号脉冲的品质因子随传输距离的变化曲线(如图3b所示)。

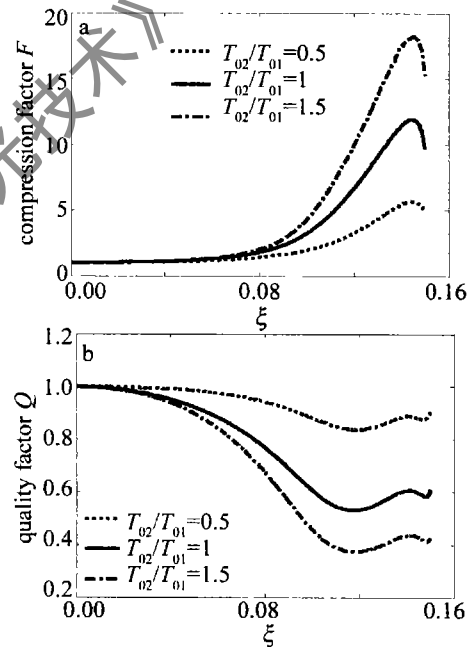


Fig. 3 Variation of compression factor  $F$  and quality factor  $Q$  with the fiber length  $\xi$  for the case  $N = 5, N_2 = 0.01, C = 0, T_{02}/T_{01} = 0.5, 1, 1.5$

从图中可以看出,当  $T_{02}/T_{01} = 0.5$  时,信号脉冲的压缩因子降低,但获得的压缩光脉冲质量较好。当  $T_{02}/T_{01} = 1.5$  时,可获得较高的压缩因子光脉冲,但其质量较差,底座较大。这是因为在抽运脉冲功率一定的条件下,脉冲宽度越窄,其峰值功率越高,其产生的交叉相位调制效应越强。对于越强的交叉相位调制效应,其诱导的在信号脉冲中心的线性正啁啾越大但范围变窄<sup>[18]</sup>,因此,只有信号脉冲中心部位较窄的一段范围得到色散补偿而被压缩,在压缩脉冲的两翼出现较宽的底座。所以根据不同的要求,选取相应的脉宽

比以获得所需的压缩光脉冲。

### 3 结论

采用分步傅里叶方法对激光双脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输特性进行了较系统的研究,提出了在正常色散区利用交叉相位调制效应压缩弱信号脉冲的新方法。研究了不同抽运功率、不同抽运脉冲啁啾参量以及不同脉宽比对信号脉冲压缩的影响。发现信号脉冲能够被压缩,而且光纤存在最佳压缩长度。对于较强功率的抽运脉冲,信号脉冲压缩所需的光纤长度较短;在抽运功率一定的条件下,选取正啁啾的抽运脉冲易于产生高压缩比的压缩信号脉冲;另外,不同的脉冲宽度对信号脉冲的压缩产生较大的影响,一般情况下,选取较窄的抽运脉冲易于获得较短的压缩信号脉冲。

#### 参 考 文 献

- [1] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002:179(in Chinese).
- [2] RUSSELL P St J. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(5605): 358-362.
- [3] BIRKS T A, KNIGHT J C, RUSSELL P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Opt Lett, 1997, 22(13):961-963.
- [4] RANKA J K, WINDELER R S, STENTZ A J. Visible continuum generation in air silica microstructure optical fiber with anomalous dispersion at 800nm[J]. Opt Lett, 2000, 25(1):25-27.
- [5] REEVES W H, KNIGHT J C, RUSSELL P St J, et al. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2002,10(14): 609-613.
- [6] BRODERICK N G R, MONRO T M, BENNET P J, et al. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities[J]. Opt Lett, 1999, 24(20):1395-1397.
- [7] WASHBURN B R, RALPH S E, WINDELER R S. Ultra-short pulse propagation in air-silica microstructure fiber[J]. Optics Express, 2002,10(13):575-580.
- [8] LIU X, XU G, KONOX W H. Soliton self-frequency shift in a short tapered air-silica microstructure fiber[J]. Opt Lett, 2001, 26(6): 358-360.
- [9] GAETA A L. Nonlinear propagation and continuum generation in microstructured optical fibers[J]. Opt Lett, 2002, 27(11):924-926.
- [10] CHANG G Q, NORRIS T B, WINFUL H G. Optimization of supercontinuum generation in photonic crystal fibers for pulse compression[J]. Opt Lett, 2003, 28(7):546-548.
- [11] CHENG C F, WANG X F, LU B. Nonlinear propagation and supercontinuum generation of a femtosecond pulse in photonic crystal fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(6): 1826-1830 (in Chinese).
- [12] WANG R X, DOU C S, YUE X C. Numerical study on a femtosecond laser pulse in photonic crystal fiber[J]. Laser Technology, 2006, 30(5):555-557 (in Chinese).
- [13] SCHREIBER T, ANDERSEN T V, SCHIMPF D, et al. Supercontinuum generation by femtosecond single and dual wavelength pumping in photonic crystal fibers with two zero dispersion wavelengths[J]. Optics Express, 2005, 13(23):9556-9569.
- [14] CHENG C, WANG X, WANG Z, et al. Nonlinear copropagation of two optical pulses of different frequencies in photonic crystal fibers[J]. Appl Phys, 2005, B80(3):291-294.
- [15] CHENG C F, OU Y W, BIE Y G. A study of the phenomenon of pulse trapping in photonic crystal fibers[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2009, 24(1):77-81 (in Chinese).
- [16] DONG L L, YANG X Y. Effect of high-order dispersion and nonlinear on compression pulse pair in PCF[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(8):792-795 (in Chinese).
- [17] CAO W H, LIU S H. Enhanced soliton-effect pulse compression by cross-phase modulation in optical fibers[J]. Science in China, 2000, 43(6):595-605.
- [18] LUO A P, XU W C, CHEN W Ch, et al. Soliton pulse compression based on cross-phase modulation in anomalous dispersive optical fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(5):421-425 (in Chinese).
- [19] WANG X M, ZHANG Y J, XIA H, et al. Measurement of CO<sub>2</sub> concentration in flame based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(4):290-295 (in Chinese).
- [20] LI N, WANG F, YAN J H, et al. The tunable diode laser absorption spectroscopy for gas concentration measurement[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(15):121-126 (in Chinese).
- [21] ROTHMAN L S, JACQUEMART D, BARBE A, et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005, 96(2):139-204.
- [22] MA W G, YIN W B, HUANG T, et al. Analysis of gas absorption coefficient at various pressures[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(2):135-137 (in Chinese).
- [23] GAO Z H. Mathematics method on lineshape function for laser material[J]. Laser Journal, 2000, 21(2):36-38 (in Chinese).
- [24] ZHOU B K, GAO Y Z, CHENG T R, et al. Principles of laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 139-140 (in Chinese).
- [25] HE J, ZHANG Q. The calculation of the resonance escape factor of helium for lorentzian and voigt profiles[J]. Phys Lett, 2006, A359(4):256-260.
- [26] ZHANG G Q, YOU J H, HE J. Physical mechanism and half-width of spectrum widening[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2008, 29(1): 84-87 (in Chinese).
- [27] TONG W H, JANG D, ZHOU D F, et al. Study on the chemical gas detecting system by CO<sub>2</sub> DIAL[J]. Laser Technololy, 2007, 31(5): 479-482 (in Chinese).

(上接第 780 页)