

文章编号: 0253-2239(2010)05-1279-06

利用光纤中的非线性偏振旋转效应提高激光脉冲对比度

汪小超 范 薇 张攀政 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要 研究了用于提高激光脉冲对比度的全光纤结构脉冲清洁剂(OPC)。对利用非线性偏振旋转效应(NPR)提高脉冲对比度进行了理论分析。计算了脉冲清洁剂对主脉冲峰值透射率与入射角度和光纤长度的关系,模拟了输出脉冲波形和脉宽的变化,并对 1053 nm 波长的百皮秒入射脉冲进行了实验。主脉冲与连续背景噪声的对比度提高 47.5 dB 以上,主脉冲与预脉冲对比度提高 16.94 dB 以上,输出信号的连续背景功率和预脉冲强度均低于探测器的最小响应极限。主脉冲的峰值功率透射率达 28.05%;脉冲宽度由 92 ps 压缩至 64 ps,与理论预期相符。利用可变衰减加光电转化的方法测量了 1 Hz 重复频率的脉冲对比度及信号透射率,解决了利用自相关仪不易测量低重复频率信号的问题。采用灵敏度更高的测量方式将测得更高的对比度提升。

关键词 光纤光学;脉冲清洁剂;非线性偏振旋转;脉冲对比度;全光纤

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1279

Pulse Contrast Enhancement Based on Nonlinear Polarization Rotation in Optical Fibers

Wang Xiaochao Fan Wei Zhang Panzheng Lin Zunqi

(National Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract An all-fiber optical pulse cleaner (OPC) is investigated based on nonlinear polarization rotation (NPR). The theoretical analysis of pulse contrast enhancement using NPR is detailed. The relation of transmittivity versus incident angle and fiber length is calculated. The change of pulse width and shape of the output pulse is investigated. And an OPC operating at 1053 nm with a hundred picoseconds pulse duration is demonstrated. The pulse contrast between main pulse and continuous wave background power is enhanced by more than 47.5 dB, and the contrast ratio between main pulse and prepulses is enhanced by more than 16.94 dB, which are both beyond the response limit of the detecting devices. The overall peak power transmittivity of the system is 28.05%, and the duration of the pulse is shortened from 92 to 64 ps, which is in agreement with the theoretical prediction. Efficiency measurements are realized using an optical-to-electrical converter and an attenuator, for the autocorrelator is not applicable to the measurement of the pulses with 1 Hz repetition rate. More enhancement of contrast ratio will be detected with precise detection.

Key words fiber optics; pulse cleaner; nonlinear polarization rotation; pulse contrast; all-fiber

1 引 言

在超短超强激光物理实验方面,世界各国广泛

采用啁啾脉冲放大(CPA)技术。在 CPA 系统中不仅要求高的激光功率,对激光脉冲对比度也提出了

收稿日期: 2009-06-25; 收到修改稿日期: 2009-07-16

作者简介:汪小超(1984—),女,博士研究生,主要从事光纤激光器和放大器等方面的研究。

E-mail: smilexc@siom.ac.cn

导师简介:林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事激光惯性约束核聚变,高功率激光驱动器等方面的研究。E-mail: zqlin@mail.shenc.ac.cn

很高的要求^[1,2]。在 CPA 系统产生超短超强激光的过程中,有多种因素会引入噪声光^[3,4],在选取单脉冲过程中,由于电光调制器或者声光调制器等选单器件的消光比有限,会导致脉冲序列有残余,形成寄生脉冲序列;在放大过程中,建立于粒子数反转基础上的放大系统会产生放大的自发辐射(ASE)光。主脉冲与这些噪声光的强度比例称为激光脉冲对比度。噪声光会在主脉冲之前到达靶场,与靶发生作用,改变主脉冲与靶作用时靶的初始状态,从而严重影响实验结果。因此必须提高激光脉冲的对比度,将噪声光的聚焦强度降低至靶的等离子体产生阈值(10^{10} W/cm²)之下。随着 CPA 技术的不断发展,人们提出多种提高脉冲对比度的方案。如采用时域滤波^[5]、频域滤波^[6]、可饱和吸收体滤波^[7,8]、自引入等离子体开关^[9]、双啁啾脉冲放大技术(DCPA)^[10]、光参变啁啾脉冲放大(OPCPA)^[11]以及高阶非线性晶体滤波^[12,13]等。利用非线性偏振旋转效应(NPR)提高激光对比度是其中简单有效的方法之一。1964年P. D. Maker等^[14]发表了关于液体中与强度相关的折射率变化理论。此后,熔石英、玻璃^[15]、二硫化碳液体^[16]、惰性气体^[17]、空气^[18]和光纤^[19]等介质中的 NPR 效应被广泛研究,并应用于激光对比度的提高。

利用光纤中的 NPR 效应,设计了一种提高激光脉冲对比度的脉冲清洁剂(OPC)。该设计实现了全光纤的结构,结构简单,成本低;各元件之间直接光纤熔接,耦合损耗小;易于操作,元件方便替换;节约电力、冷却装置;结构紧凑,安全可靠。对1053 nm波长的百皮秒脉冲进行了清洁实验,可使主脉冲与连续背景噪声的对比度提高 47.5 dB 以上,主脉冲与预脉冲对比度提高 16.94 dB 以上(达到测量设备测量极限),信号峰值功率透射率达 28.05%。

2 NPR 效应原理

当入射光的强度足够大时,可以在光纤中引起非线性双折射^[20],其大小与入射光的光场强度有关。光纤中两主轴方向的折射率 n_x, n_y 为

$$n_x = n_{x0} + \Delta n_x, \quad (1)$$

$$n_y = n_{y0} + \Delta n_y, \quad (2)$$

$$\Delta n_x = n_2 \left(|E_x|^2 + \frac{2}{3} |E_y|^2 \right), \quad (3)$$

$$\Delta n_y = n_2 \left(|E_y|^2 + \frac{2}{3} |E_x|^2 \right), \quad (4)$$

式中 n_{x0}, n_{y0} 为折射率的线性部分,与入射光的强

度无关; $\Delta n_x, \Delta n_y$ 为折射率的非线性分量,与入射光光强 $|E_x|^2, |E_y|^2$ 有关, n_2 为石英光纤中的非线性折射率系数(2.6×10^{-20} m²/W)。

功率为 P_0 的线偏振光以偏振方向与光纤的慢轴(x 轴)成 θ 角入射,在光纤中传输距离 L 后,在两主轴方向产生非线性相移差

$$\Delta\varphi_{\text{NL}} = \varphi_x - \varphi_y = (2\pi L n_2 / 3\lambda A_{\text{eff}}) P_0 \cos 2\theta, \quad (5)$$

式中 λ 为真空中的波长, A_{eff} 为有效纤芯截面,有 $A_{\text{eff}} = \pi r_{\text{eff}}^2, r_{\text{eff}}$ 为有效模场半径。

由(5)式,光纤中的两主轴方向的非线性相移差与入射光功率 P_0 有关,即在光纤的输出端,光的偏振态与 P_0 相关,这种效应称为非线性偏振旋转(NPR)。利用 NPR 效应,在光纤输出端恰当地放置偏振控制器件和检偏器件阻挡入射光的低强度成分,而高强度入射光的偏振态与低强度光的偏振态不同,可以通过检偏器,实现提高脉冲对比度的效果。检偏器的透射率 T_p 可以表示为

$$T_p = P_t / P_0 = \sin^2(\Delta\varphi_{\text{NL}}/2) \sin^2(2\theta), \quad (6)$$

式中 P_t 为透射光功率。

3 利用 NPR 效应提高脉冲对比度的模拟计算

根据(5)式和(6)式所描述各物理量之间的关系,对峰值功率 550 W,脉宽 92 ps,脉冲对比度 40 dB 的 1053.1 nm 的双曲正割入射脉冲进行模拟计算。模拟所用光纤的有效模场直径(MFD)为 6 μm 。

对特定的输入功率和光纤长度,改变入射角度 θ 可以改变脉冲清洁器的透射率,如图 1(a)所示,光纤长度为 16 m 时,脉冲清洁器的透射率随入射角度 θ 的变化而改变。对 550 W 的入射功率, θ 取 0.8828 rad 时有最佳透射率。同时,对特定强度的输入脉冲,要得到最佳的清洁效果需要选取适当的光纤长度 L 。光纤长度过短不能产生足够的偏振旋转,无法实现主脉冲的高透射率;光纤长度过长会引起太多的非线性效应和色散效应,从而使脉冲形状发生畸变。由图 1(b), θ 为 0.8828 rad 时,对于 550 W 的输入脉冲,光纤长度超过一定数值之后,长度的增加对输入脉冲的最佳透射率影响很小,曲线变得平坦,所以根据计算结果在平坦区选取较小的光纤长度,既可以实现清洁作用,又可以减小脉冲畸变。取光纤长度 L 为 16 m,在 θ 为 0.8828 rad 时,对 550 W 入射功率有最佳透射率 96.24%。

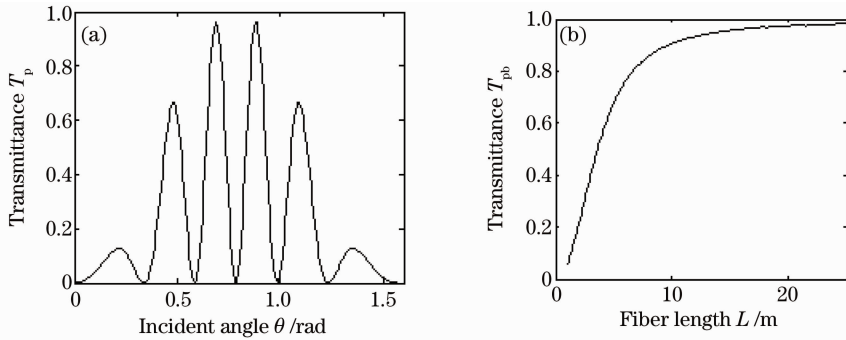


图 1 透射率曲线。(a)透射率 T_p 与入射角度 θ 的关系;(b) 不同光纤长度 L 的最佳透射率 T_{pb}

Fig.1 Transmittivity. (a) Transmittivity T_p versus different incident angles θ ;(b) best transmittivity T_{pb} versus different fiber lengths L

由(5)式和(6)式可知,在固定的光纤长度和入射角度条件下,不同的入射功率对应不同的透射率,且非线性相移差 $\Delta\varphi_{NL}$ 仅与入射功率 P_0 有关并与其成正比,透射率 T_p 与 $\sin^2(\Delta\varphi_{NL}/2)$ 成正比。在光纤长度为 16 m,入射角度 θ 为 0.8828 rad 时,入射功率与透射率有如图 2 所示关系。可以看出,该光纤长度和入射角度情况下,低于信号光的强度所对应的透射率均低于信号光的透射率,满足对 550 W 入射信号功率实现清洁作用的要求。而峰值功率超过曲线最高点(对应功率 558 W)的入射信号透射率开始下降,如果要对更高功率的入射信号进行清洁需重新计算光纤长度和入射角度。所以,根据入射脉冲强度选取适当的光纤长度 L 和入射角 θ 即可实现提高脉冲对比度的效果。对上述脉冲对比度 40 dB 的输入脉冲信号进行模拟运算,可实现 76 dB 的对比度提高。

由于脉冲清洁器对不同功率的透射率不同,会使得脉冲的前后沿因功率低于信号峰值功率而透射率同样低于信号峰值处透射率,并且其透射率与前后沿各处光功率有关。如图 3(a)中,实线为输入脉

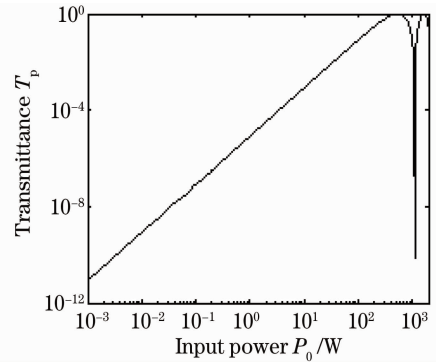


图 2 不同入射功率 P_0 的透射率 T_p

冲时间波形,点连线为脉冲各处对应的透射率。由此导致清洁后的脉冲信号前后沿形状改变,即清洁过程中伴随着脉冲宽度变窄和时间波形变化的现象的发生。对长 16 m 的光纤,脉宽 92 ps 的双曲正割输入信号,输出脉宽变为 68 ps,并且不再是双曲正割波形图 3(b)。图 3(b)中点连线为输入脉冲时间波形,实线为输出脉冲波形,虚线是与输出信号同等峰值功率的双曲正割波形。

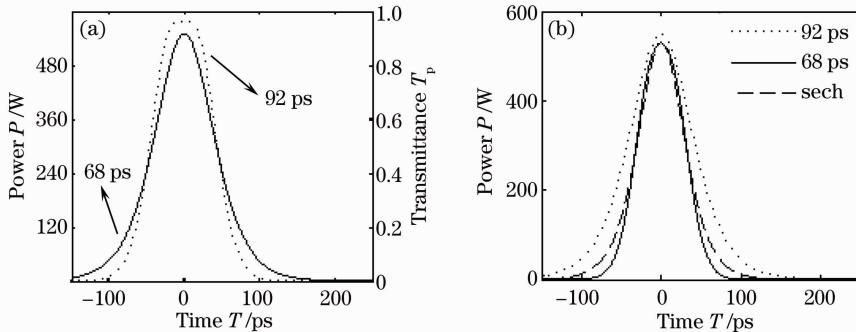


图 3 输出脉宽及波形变化。(a)输入脉冲各部分的不同透射率;(b)脉宽及波形变化

Fig.3 Change of pulse width and shape. (a) transmittivity of different parts of input signal; (b) change of pulse width and shape

根据理论模拟,改变输入信号的强度和脉冲清洁器的光纤长度等参数,脉冲宽度的窄化程度也会改变。

4 实验及讨论

实验所用信号光为:YLF 锁模激光器(GE100)输出的中心波长为 1053.1 nm,谱宽为 0.016 nm,

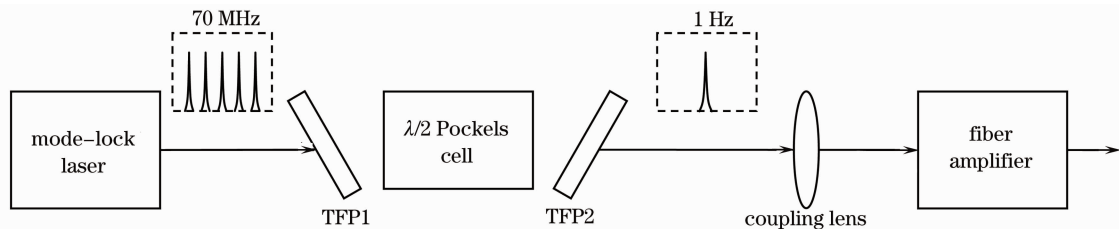


图 4 脉冲清洁器输入信号装置图。TFP 为薄膜偏振片

Fig. 4 Schematic diagram of input signal generation of the pulse cleaner. TFP is thin-film polarizer

脉冲清洁器采用图 5 所示的实验结构,通过监控分束器(Coupler)的监控端口,调整偏振控制器 PC-I,可以使信号脉冲以最小的损耗通过在线起偏器 ILP-I 输入到系统中。偏振控制器 PC-II 用于调整入射光与光纤主轴的夹角 θ ,优化信号脉冲的

重复频率 70 MHz 的双曲正割锁模脉冲,经过电光开关选单与光纤放大器放大(图 4),得到重复频率为 1 Hz,峰值功率为 1000 W,脉宽(半峰全宽)为 92 ps 的脉冲信号,噪声平均功率为 2 mW。噪声主要来源于光纤放大器的放大的自发辐射(ASE)和选单系统泄漏的残余脉冲序列。

透射率。光信号经过一段普通单模光纤(1060-XP,有效模场直径 $6 \mu\text{m}$)传输,发生非线性偏振旋转。偏振控制器 PC-III 补偿光纤本身的固有线性双折射,使低功率光的偏振态重新变为线偏振状态并调节线偏振角度,使低功率光被检偏器阻拦。

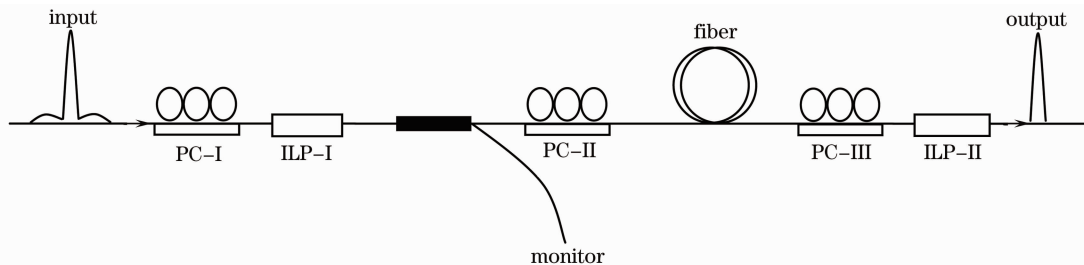


图 5 脉冲清洁器结构原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the optical pulse cleaner

光纤偏振控制器采用了三环式光纤偏振控制器,起偏器和检偏器均采用光纤式在线偏振器,器件之间采用光纤直接熔接的方法连接,实现了全光纤结构。

因为实验所用光源是重复频率为 1 Hz 的单脉冲信号,所以不能使用自相关仪作为检测仪器。使用带有光纤输入端口的光电 PIN 管和光纤在线可调衰减器测量脉冲对比度和脉冲透射率。将脉冲清洁器的输入信号连接光纤衰减器和光电 PIN 管探测器,用示波器观测,在示波器显示幅值 V_0 。时测量衰减器的衰减倍数 α_1 (dB); 再于脉冲清洁器输出端连接光纤衰减器和光电 PIN 管探测器,调节衰减器,当示波器显示幅值 V_0 。时测量衰减器的衰减倍数 α_2 (dB)。脉冲清洁器的信号透射率 T_p 满足

$\alpha_1 - \alpha_2 = -10\lg(T_p)$ 。同理可测脉冲对比度。

利用光纤衰减器和光电 PIN 管可以清楚地观测到输入信号前方的预脉冲序列。图 6(a)为主脉冲前方的预脉冲波形图,虚线部分为已经饱和的主脉冲信号。输入信号的主脉冲与预脉冲强度对比度为 43.75 dB。

脉冲清洁器的信号峰值透射率为 28.05%,输出端连续背景噪声功率降低到 10 nW 以下(低于功率计最小探测值),即主脉冲信号与连续背景光的对比度提高了 47.5 dB 以上。输出信号如图 6(b)所示,预脉冲强度低于 PIN 管的最小响应值,主脉冲与预脉冲的强度对比度提高了 16.94 dB 以上。采用灵敏度更高的对比度测量方法将测得更高的对比度提高,例如使用更高灵敏度的光电探测器件。

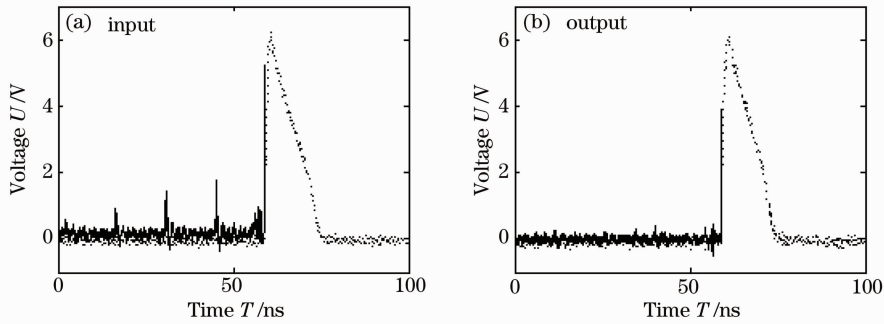


图 6 脉冲清洁剂输入与输出信号

Fig. 6 Signal before and after the pulse cleaner

上述实验中耦合进入光纤发生非线性偏振旋转效应的信号峰值功率为 550 W,脉冲清洁剂中使用的光纤长度为 16 m。脉冲清洁剂中由监控分束器、偏振控制器、在线起偏器等器件的固有插入损耗和光纤熔接及光纤跳线连接引入的总系统损耗为 4.37 dB,即排除系统固有损耗后信号峰值透射率为 70.8%。实验所得透射率 μ 与理论值的偏差据推断由偏振控制器 PC-II 的调节精度引起。降低系统的耦合损耗,优化偏振控制器的设置将有利于系统信号透射率的进一步提高。如果采用强度更大的输入信号,可以使用更短的光纤长度,同时可以使脉冲对比度提高的测量更加接近实际值。

可以通过调节偏振控制器 PC-I,改变耦合入光纤的光脉冲强度。保持偏振控制器 PC-II 与 PC-III 的状态不变,即可测得上述实验状态下不同入射光功率的透射率(图 7)。实验测得透射率随入射光功率的降低而降低,与理论分析相同。

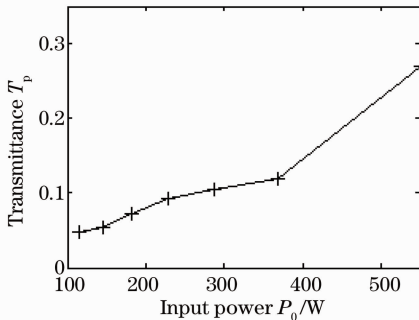


图 7 脉冲清洁剂对不同强度输入信号的透射率

Fig. 7 Transmissivity vs different incident input power of the pulse cleaner

利用高速光电 PIN 管(8G)和示波器(12G)测得入射信号半峰全宽为 92 ps,输出信号半峰全宽为 64 ps(图 8)。与理论计算的脉冲窄化现象相符合。

5 结 论

设计了一种用于提高激光脉冲对比度的全光纤

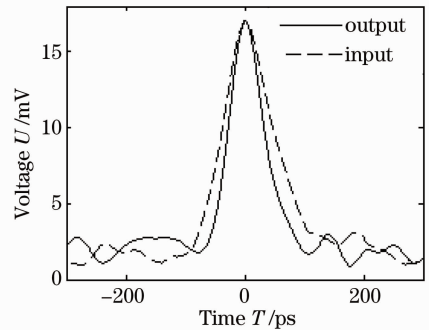


图 8 脉冲清洁剂输入信号与输出信号的脉冲宽度
Fig. 8 Pulse width of input signal and output signal of the pulse cleaner

结构脉冲清洁剂。结构简单可靠,成本低,效率高。对利用非线性偏振旋转效应提高脉冲对比度进行了理论分析并对 1053 nm 波长的百皮秒脉冲进行了实验,主脉冲与连续背景噪声的对比度提高 47.5 dB 以上,主脉冲与预脉冲对比度提高 16.94 dB 以上。因为输出信号的连续功率及预脉冲幅度均低于探测器的最小响应极限,所以采用灵敏度更高的测量方式将测得更高的对比度提升。峰值功率透射率达 28.05%,降低系统耦合损耗和提高偏振控制器精度将有利于系统透射率的提高。与理论模拟相符,脉冲清洁器的清洁过程中会产生脉冲窄化现象,脉冲宽度由 92 ps 压缩至 64 ps。

参 考 文 献

- Zhang Fuling, Ouyang Xiaoping, Xie Xinglong *et al.*. Contrast measurement of ultrashort laser pulse with third order correlation technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1171~1174
张福领, 欧阳小平, 谢兴龙 等. 超短激光脉冲对比度的三阶相关测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1171~1174
- Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zhang Panzheng *et al.*. Second order autocorrelation applied to femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 742~745
欧阳小平, 张福领, 张攀政 等. 短脉冲激光的二阶自相关[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 742~745
- Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space[J].

- Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 272~274
郭爱林, 杨庆伟, 谢兴龙 等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 272~274
- 4 Yang Qingwei, Guo Ailin, Xie Xinglong *et al.*. Influence of mirror curvature radius manufacture errors in Offner stretcher on output pulse contrast [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1584~1589
杨庆伟, 郭爱林, 谢兴龙 等. Offner 展宽器曲面镜误差对输出脉冲对比度的影响 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1584~1589
- 5 K. Yamakawa, H. Shiraga, Y. Kato *et al.*. Prepulse-free 30-TW, 1 ps Nd: glass laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(20): 1593~1595
- 6 M. D. Perry, F G. Patterson, J. Weston. Spectral shaping in chirped-pulse amplification [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(7): 381~383
- 7 Y. H. Chuang, D. D. Meyerhofer, S. Augst *et al.*. Suppression of the pedestal in a chirped-pulse-amplification laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(6): 1226~1235
- 8 J. W. Dawson, M. J. Messlerly, H. H. Phan *et al.*. High-energy, short-pulse fiber injection lasers at Lawrence Livermore National Laboratory [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2009, **15**(1): 207~219
- 9 H. C. Kapteyn, M. M. Murnane, A. Szoke *et al.*. Prepulse energy suppression for high-energy ultrashort pulses using self-induced plasma shuttering [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7): 490~492
- 10 M. P. Kalashnikov, E. Risse, H. Schönngel *et al.*. Double chirped-pulse-amplification laser; a way to clean pulses temporally [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(8): 923~925
- 11 I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie *et al.*. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **144**(1-3): 125~133
- 12 A. Jullien, O. Albert, F. Burgy *et al.*. 10^{-10} temporal contrast for femtosecond ultraintense lasers by cross-polarized wave generation [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(8): 920~922
- 13 A. Cotel, A. Jullien, N. Forget *et al.*. Nonlinear temporal pulse cleaning of a 1 μm optical parametric chirped-pulse amplification system [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(1): 7~10
- 14 P. D. Maker, R. W. Terhune, C. M. Savage *et al.*. Intensity-dependent changes in the refractive index of liquids [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, **12**(18): 507~509
- 15 A. Owyong, R. W. Hellwarth, Nicholas George. Intensity-induced changes in optical polarizations in glasses [J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **5**(2): 628~633
- 16 K. Sala, M. C. Richardson. A passive nonresonant technique for pulse contrast enhancement and gain isolation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**(4): 2268~2276
- 17 D. Homoelle, A. L. Gaeta, V. Yanovsky *et al.*. Pulse contrast enhancement of high-energy pulses by use of a gas-filled hollow waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(18): 1646~1648
- 18 A. Jullien, F. Augé-Rochereau, G. Chériaux *et al.*. High-efficiency, simple setup for pulse cleaning at the millijoule level by nonlinear induced birefringence [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(18): 2184~2186
- 19 J. W. Dawson, Z. M. Liao, S. Mitchell *et al.*. Fiber laser front ends for high-energy short pulse lasers [J]. *SPIE*, 2005, **5709**: 37~44
- 20 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. San Diego: Academic Press, 2001. 204~218