

文章编号: 0253-2239(2007)04-0701-5

拼接光栅压缩器的时域特性*

马雪梅¹ 戴亚平² 朱健强¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)
(² 中国工程物理研究院激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要: 在拼接光栅和拼接光栅压缩器的设计中,子光栅调节偏差不可避免,各维偏差与拼接光栅的时间特性之间的关系很关键。通过脉冲压缩理论分析得到各维偏差和聚焦脉冲时间宽度展宽之间的解析关系,从数值计算结果分析,面平行左右偏差对脉冲的时间宽度影响较大,必须控制在 $21.08 \mu\text{rad}$ 内;条纹密度差异对脉冲宽度的影响很显著,相对条纹密度的比值应控制在 10^{-5} 以内;从消除角色散的角度分析,面平行俯仰偏差和条纹平行度偏差可以相互补偿,条纹密度差异和面平行左右偏差也可以相互补偿。

关键词: 光学器件; 拼接光栅压缩器; 时域特性; 脉冲展宽; 偏差补偿

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Temporal Property of Tiled Grating Compressor

Ma Xuemei¹ Dai Yaping² Zhu Jianqiang¹

(¹ *Joint Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)
(² *Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800*)

Abstract: Alignment errors of sub-aperture gratings in the optical design of tiled gratings and tiled grating compressors are almost unavoidable. It is important to study the relation between alignment errors and temporal properties of the tiled grating. Analyzed by pulse compression theory, the relation between these alignment errors and focused pulse width broadening is obtained. And the numerical calculation results show that planar alignment errors have much more important influences on the pulse duration, which must be controlled within $21.08 \mu\text{rad}$, and the groove-width difference also affects the pulse duration severely, so the ratio between the groove-width difference and groove-width must be controlled within 10^{-5} . From the point of view of eliminating angular dispersion, the planar tilt errors and groove parallelism can compensate each other, and the groove-width difference and planar errors of tip can also compensate each other.

Key words: optical devices; tiled grating compressor; temporal property; pulse-broadening; alignment errors compensation

1 引 言

随着短脉冲、大能量激光系统的发展,给激光与物质相互作用、惯性约束聚变,包括 X 射线照相术和快点火的研究带来了新的契机。点火条件下的高能量密度物理实验中对高强度反激光的研究,以及

综合的快点火低温靶实验都有赖于短脉冲、高功率激光系统的发展。对于啁啾脉冲放大(CPA)激光系统而言,脉冲压缩器反射光栅的尺寸和破坏阈值决定了高功率激光系统中超短脉冲的能量,是非常关键的因素。显然,大尺寸光栅能进一步扩展拍瓦激

* 国家 863 计划(2006AA804207)资助课题。

作者简介: 马雪梅(1980—),女,甘肃武威人,博士研究生,主要从事阵列光栅及阵列光栅压缩器的光传输理论研究。

E-mail: maxuemei@mail.siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,江苏苏州人,研究员,博士生导师,主要从事高功率激光驱动器的总体光学设计、结构设计的研究。E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

收稿日期: 2006-03-17; 收到修改稿日期: 2006-08-15

光系统短脉冲的能量,用拼接光栅的方法制作大尺寸光栅代替米尺寸的介质膜光栅是解决问题的有效途径^[1~3]。

在拼接光栅和拼接光栅压缩器的设计中,存在一些理论问题与传统光栅对压缩器不同,在拼接光栅系统中,相邻的两光栅间有 5 维自由度:三维角度的旋转,沿光栅面法线方向和色散方向的平移;拼接子光栅空间位置的偏差和光栅制作工艺缺陷对拼接光栅系统的时间和空间特性的作用引发了新的研究课题^[4]。

传统压缩器的光栅对必须严格平行,压缩系统的特性取决于光栅对间距、入射角和光栅条纹宽度;而对于拼接光栅压缩器,拼接子光栅之间相对位置的影响,包括条纹密度差异、条纹平行度以及子光栅的面平行。本文分析了拼接光栅引入的各维偏差对聚焦压缩脉冲时间宽度的影响,并根据偏差引起的脉冲展宽应小于 10% 的要求为例计算了几维偏差的精度要求;同时分析了各维角度偏差、条纹密度差异之间的补偿关系,以及对脉冲前沿倾斜、脉冲展宽

的作用机理,并且讨论了拼接光栅压缩器调节偏差引入的剩余三阶色散效应^[5,6]对压缩脉冲的影响。

2 原 理

如果光学装置产生非零角色散,那么短脉冲在传输过程中就会出现脉冲前沿倾斜,聚焦以后,由于色散引起的有效脉冲宽度为

$$T_c^2 = T_c^2 + \left(\frac{D\lambda}{c} \frac{d\epsilon}{d\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

其中 c 为真空中的光速, D 为聚焦光束口径, λ 为波长, $d\epsilon/d\lambda$ 为系统角色散。引发脉冲前沿倾斜^[7]的原因就在于此,理想拼接光栅压缩器像传统光栅对压缩器一样,可以得到最短的压缩脉冲,聚焦处相位前沿和脉冲前沿之间没有时间差异,如图 1(a) 所示^[8],其中 θ 为脉冲前沿倾斜角, G_1, G_2 为光栅。然而,如果拼接光栅的调节偏差没有完全消除,脉冲前沿和相位前沿会出现差异,如图 1(b) 所示,或者出现行波脉冲,从而引起焦点处压缩脉冲的时间宽度被扩展,如图 1(c) 所示。

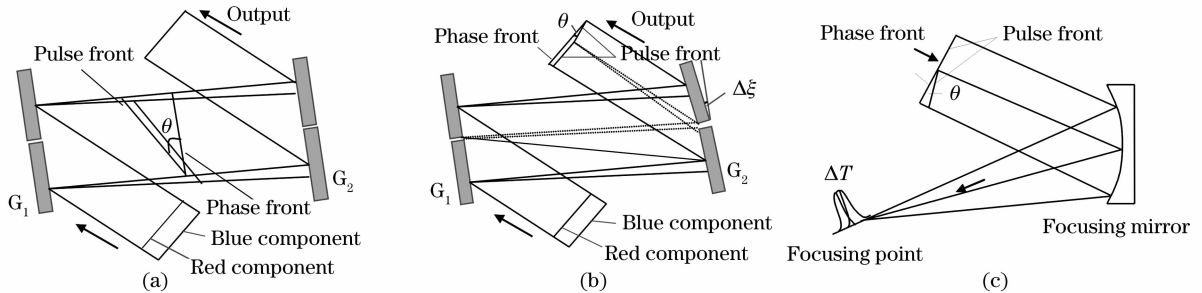


图 1 由于拼接光栅空间位置偏差引入的脉冲宽度展宽

Fig. 1 Stretch in pulse duration due to the tilt angle of the tiled grating. (a) Ideal compression, (b) compression with tilt angle $\Delta\xi$, (c) pulse stretch at focal point

脉冲前沿倾斜角和系统角色散^[9]之间有关系:

$\tan \theta = \lambda \frac{d\epsilon}{d\lambda}$; T_c 为聚焦前的脉冲宽度,也就是压缩器的出射脉冲宽度,取决于输入脉冲宽度 T ,二次相位啁啾 b 以及压缩系统提供的二阶色散 ϕ_2 ,假设压缩器的输入脉冲

$$E(t) \propto \exp[-(1-ib)t^2/T^2 + iw_0 t],$$

那么用过压缩器得到的压缩脉冲宽度为

$$T_c = (2\ln 2)^{1/2} \left[\frac{T_0^4 + (bT_0^2 - 2\phi_2)^2}{T_0^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

其中 $T_0^2 = T^2/(1+b^2)$,如果给定了入射脉冲,那么脉冲压缩宽度由压缩系统所提供的二阶色散决定。对于理想的拼接光栅压缩器,系统提供的二阶色散为

$$\phi_{20} = \frac{-4\pi^2 cm_2^2 g}{d^2 \alpha^3 [1 - (2\pi cm_2/d\omega - \sin \beta_1)^2]^{3/2}}, \quad (3)$$

其中 g 为光栅间垂直距离, d 为条纹周期, m_2 为出射光栅的衍射级次, β_1 为光束入射角,可以获得的最短脉冲宽度为 $T_{\min} = (2\ln 2)^{1/2} T/(1+b^2)^{1/2}$,而对于存在调节偏差的拼接光栅压缩器,得到的压缩宽度受各维角度调节偏差的影响,压缩宽度相对理想压缩有一定的展宽,展宽程度由(1)式、(2)式共同决定。从(1)式可以看出,聚焦处脉冲的展宽程度取决于聚焦前光束口径,压缩系统的角色散和压缩器的出射脉冲宽度,而角度偏差和位移偏差改变了系统的二阶色散,并不能得到理想压缩宽度。

3 各维偏差对脉冲宽度的影响分析

在拼接光栅设计理论中,用到了两个标准,其一,理想光栅压缩器产生最短的压缩脉冲,并且压缩

器之后也没有角色散,焦点处的时间展宽可以忽略。通过与理想压缩器相比,可以确定拼接光栅压缩器的调节偏差;其二,由于调节偏差引入的时间展宽必须控制在 10% 以下。

为了更深入地了解各维拼接误差对聚焦脉冲宽度的展宽程度,我们以两片 2×1 的拼接光栅(沿色散方向拼接)为例进行模拟计算。以拼接光栅构成压缩器,相当于构成压缩器的两片光栅处于任意位置,第一块光栅的入射光束和衍射光束的方位分别由 α_1, β_1 和 α'_1, β'_1 确定,第二块光栅上入射光束和衍射光束的方位分别由 α_2, β_2 和 α'_2, β'_2 确定, m_1, m_2 分别为入射和出射光的衍射级次。第二块光栅相对第一块光栅的位置由三个正交方向的旋转角度和一个方向上的平移表征,如图 2 所示:绕 X_2 轴的角度 $\Delta\zeta$ (左右偏差),绕 Y_2 轴的 $\Delta\nu$ (俯仰偏差),绕 Z_2 轴的 $\Delta\xi$ (条纹不平行度)以及 $A_1 \rightarrow A_2$ 的方向的平移,

最后一项并不影响衍射光束方向和产生多余的角色散,故只在计算相移的时候才考虑。

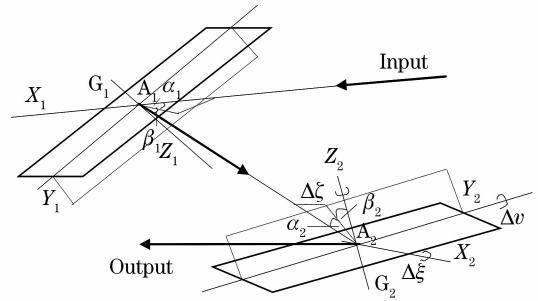


图 2 光栅对的光束传输

Fig. 2 Light beam propagating through a grating pair

由空间光栅方程和空间矢量的旋转变换矩阵^[10],可以得到与出射光束垂直并且相互垂直的两个方向的角色散 $d\alpha'_2/d\lambda$ 和 $d\delta'_2/d\lambda$ 和各维角度偏差之间的关系^[8,11]:

$$\frac{d\alpha'_2}{d\lambda} = -\frac{m_1}{d_1 \cos \alpha_2 \cos \beta'_1} [\sin \Delta\zeta \cos(\beta'_1 - \Delta\xi) + \cos \Delta\zeta \sin(\beta'_1 - \Delta\xi) \sin \Delta\nu], \quad (4)$$

$$\frac{d\delta'_2}{d\lambda} = \frac{-1}{\cos \delta'_2 \cos \beta'_2} \left[\sin \alpha_2 (1 + \sin \beta_2 \sin \beta'_2) \frac{d\alpha_2}{d\lambda} + \sin \beta'_2 \left(\frac{m_2}{d_2} - \cos \alpha_2 \cos \beta_2 \frac{d\beta_2}{d\lambda} \right) \right], \quad (5)$$

其中

$$\frac{d\beta_2}{d\lambda} = \frac{m_1 \cos^2 \beta_2}{d_1 \cos \beta'_1 \gamma_3} \{ \cos \alpha_1 \cos \Delta\nu \cos \Delta\zeta - \sin \alpha_1 [\cos \Delta\zeta \sin \Delta\nu \cos(\beta'_1 - \Delta\xi) - \sin \Delta\zeta \sin(\beta'_1 - \Delta\xi)] \}, \quad (6)$$

$$\sin \alpha_2 = (\sin \Delta\zeta) \gamma_1 - (\cos \Delta\zeta) \gamma_2, \quad \tan \beta_2 = [(\cos \Delta\zeta) \gamma_1 + (\sin \Delta\zeta) \gamma_2] / \gamma_3, \quad (7)$$

$$\gamma_1 = \cos \alpha_1 \sin(\beta'_1 - \Delta\xi),$$

$$\gamma_2 = \sin \alpha_1 \cos \Delta\nu + \sin \Delta\nu \cos \alpha_1 \cos(\beta'_1 - \Delta\xi),$$

$$\gamma_3 = -\sin \alpha_1 \sin \Delta\nu + \cos \Delta\nu \cos \alpha_1 \cos(\beta'_1 - \Delta\xi).$$

由(1)式~(6)式可以得到聚焦对脉冲宽度的展宽,应用(2)式及表 1 的基本参量进行计算,求得偏差情况下拼接光栅压缩器的二阶色散和脉冲展宽量^[11]。

表 1 激光束和光栅参量

Table 1 Parameters of laser beam and grating

Laser beam diameter /mm	350
Duration of the compressed pulse /ps	0.2
Central wavelength /nm	1053
Groove width /mm	1480^{-1}
Incident angle /($^\circ$)	52
Perpendicular distance /m	3

3.1 条纹宽度差异和前后位移偏差的影响

如果不同子光栅间存在条纹宽度差异 Δd , 拼接光栅的压缩脉冲宽度就和理想情况($\Delta d = 0$)不同。根据(3)式、(4)式,得到此条件下系统角色散为

$$\frac{d\delta'_2}{d\lambda} = -\frac{\tan \beta'_2}{\cos \delta'_2} \left[\frac{m_2}{d_2} - (\cos \beta_2) \frac{m_1}{d_1} \right],$$

由(1)式可得到 Δd 对压缩脉冲的作用,计算结果如图 3 所示,根据(1)式、(2)式可知,在 $\Delta\xi = \Delta\zeta = \Delta\nu = 0$ 的情况,条纹差异所引起的角色散会使得聚焦处脉

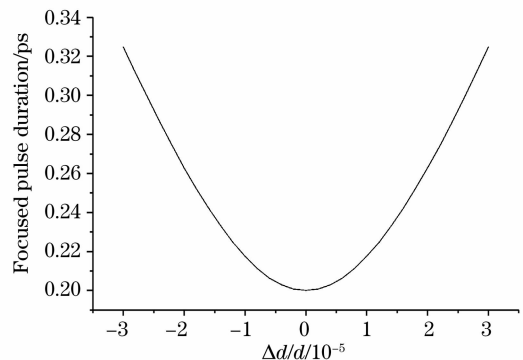


图 3 Δd 引起的角色散在聚焦处对脉冲的展宽。

Fig. 3 Stretch in pulse duration at the focal point due to the angular dispersion produced by Δd

冲展宽,根据聚焦展宽 $\leq 10\%$ 的要求,允许的偏差量 $\Delta d/d \leq 1 \times 10^{-5}$ 。

由(2)式、(3)式可以得到前后位移偏差对系统群速色散影响很小,大约几个毫米的位移变化才能使得脉冲宽度产生1%的展宽。

3.2 面平行俯仰偏差的影响

若面平行俯仰没有调好,此时压缩系统的二阶色散^[12]为

$$\begin{aligned} \phi''(\omega_0, \Delta\nu) &= \phi''_0(\omega_0)F + \phi'_0(\omega_0)F', \\ (\Delta\nu \neq 0, \Delta\xi = \Delta\zeta = 0) \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{1 + \sin \Delta\nu \tan \beta'_1}, \\ F' &= \frac{2\pi c \sin \Delta\nu}{\omega^2 d \cos^3 \beta' (1 + \sin \Delta\nu \tan \beta'_1)^2}, \\ \phi'_0(\omega_0) &= \frac{g[1 + \cos(\beta_1 - \beta'_1)]}{c \cos \beta'}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \phi(\omega_0)}{d\omega^2} &= -\frac{\lambda_0^3 L_0}{2\pi c^2 \cos^2 \beta_{20}} \left[\frac{m_1 m_2}{d_1 d_2 \cos \beta'_{10}} - \cos(\beta_{20} - \beta'_{20}) \left(\frac{d\delta'_2}{d\lambda} \right)^2 - \frac{m_1 \cos \beta'_{20}}{d_1 \cos \beta'_{10}} \frac{d\delta'_2}{d\lambda} \right], \\ \frac{d\delta'_2}{d\lambda} &= \left(-\frac{1}{d_2} + \frac{\cos(\beta'_1 - \Delta\xi)}{d_1 \cos \beta'_1} \right) / \cos \beta'_2, \end{aligned}$$

其中 $\beta_2 = \beta'_1 - \Delta\xi, \delta'_2 = \pi/2 - \beta'_2$ 。

面平行的左右偏差引起的压缩脉冲宽度变化的计算结果如图5所示,脉冲的空间子光束和角度偏差对压缩器出射脉冲宽度几乎没有影响,但是脉冲群延迟会随着光束的不同部分和角度偏差而变化,产生相位前沿和脉冲前沿的差异,从而导致焦点处脉冲宽度的展宽,允许的左右偏差 $\Delta\xi \leq 21.08 \mu\text{rad}$,主要取决于群延迟对光束不同部分的依赖性。

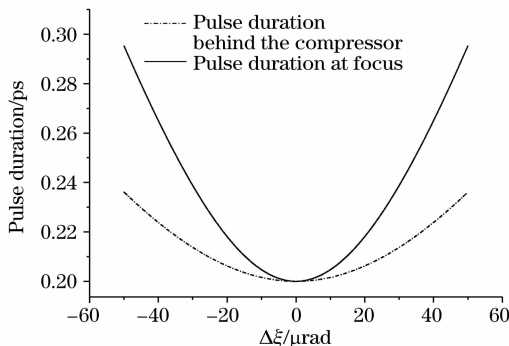


图5 面平行左右偏差 $\Delta\xi$ 引起的压缩脉冲展宽

Fig. 5 Broadening of the compressed pulse due to the tilt angle $\Delta\xi$

3.3 条纹平行度偏差的影响

对于大口径光束,聚焦是使脉冲宽度展宽的主

要因素,因此对压缩系统消除角色散是非常必要的,这意味着系统的衍射角对波长的微分为零。根据(3)式、(4)式可以得到几维偏差之间的关系:

$$\begin{aligned} \sin \Delta\nu &= -\tan \Delta\zeta \cotan(\beta'_1 - \Delta\xi), \\ \frac{d_1 + \Delta d}{d_1} &= \frac{\cos \beta'_1}{\cos(\beta'_1 - \Delta\xi)}, \\ \Delta\zeta \neq 0, \Delta\xi = \Delta\nu = 0, \end{aligned}$$

β' 为入射光栅的光束衍射角,与波长有关系,意味着只有某一波长才能满足角色散为零的条件;如果光栅调节偏差满足 $\Delta\nu = 0, \Delta\zeta = 0$,并且对于某一特定波长,拼接光栅的条纹密度差异 Δd 和左右面平行偏差 $\Delta\xi$ 满足第二个方程式的,那么系统的角色散就可以消除;但是就不能满足其他光谱角色散为零的条件,除非光栅条纹密度是连续可变的。根据各维偏差的补偿关系可以确定,对于中心波长1053 nm、入射角为 52.5° 的条纹平行度精度要求为: $\Delta\zeta \leq 34.9 \mu\text{rad}$ 。

4 高阶色散的影响

我们知道,光栅对相移的各阶系数分别表征不同的物理意义^[4,13],零阶和一阶项分别表示脉冲总的相移量和群速色散;二阶项系数表示线性啁啾,负责群速色散,主要决定啁啾脉冲放大激光系统的展

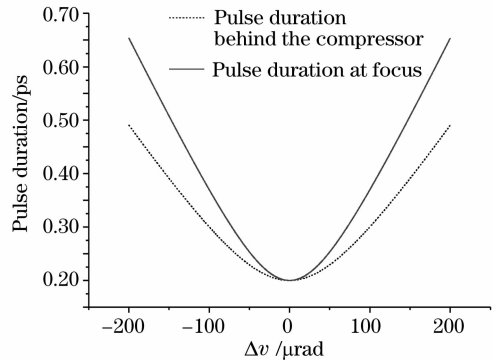


图4 面平面俯仰偏差引起的脉冲展宽

Fig. 4 Pulse broadening due to the planar tilt error

3.3 面平行左右偏差的影响

若面平行左右偏差没有调好,压缩系统对应的二阶色散^[8]为

宽和压缩量,是相位方程中最重要的一项;高阶项表征位相畸变和非线性啁啾,三阶、四阶系数主要负责再压缩脉冲光束的时间失真特性。从原理上讲^[14],如果展宽器(压缩器)的光栅严格地反平行(平行),光束以相同的入射角使用,压缩器相移的三阶效应就不显著。然而,由于拼接光栅存在调节偏差,三阶效应对时间轮廓有非常重要的影响。为了使问题明了,我们假设初始的三阶效应在放大之前被展宽器完全补偿,剩余的三阶效应仅由拼接光栅的调节偏差引入,估算压缩脉冲剩余三阶效应通过三步:首先计算没有任何偏差情况下的三阶系数 ϕ_{30} ($\Delta\xi=\Delta\nu=\Delta\zeta=0$);再引入对脉冲展宽影响最大的左右偏差($\Delta\xi\neq 0, \Delta\nu=\Delta\zeta=0$),计算 ϕ_3 ;最后计算剩余三阶相 $\Delta\phi_3=\phi_3-\phi_{30}$;用高斯线型拟合计算结果,得到压缩脉冲的宽度。结果表明如果初始三阶效应被脉冲展宽器完全补偿,剩余三阶效应对压缩脉冲宽度的影响很小,轻微地增加了压缩脉冲的基底,而且没有拖尾;若初始三阶效应没有被完全补偿,脉冲轮廓不再是高斯型,且出现拖尾,峰值强度逐渐降低。因此,通过脉冲展宽器补偿初始三阶效应是非常重要的。

5 结 论

分析了拼接光栅的各维调节偏差和时间特性的关系,根据理论模型和参量分析得到,面平行左右偏差对脉冲的时间特性影响较大,条纹密度差异对脉冲宽度的展宽作用也很显著;在数值分析中改变入射波长和光束口径,得到各维调节偏差对脉冲时间特性影响程度,其变化趋势是一致的。从消除角色散的角度分析,面平行俯仰偏差和条纹平行度偏差可以相互补偿,条纹密度差异和面平行左右偏差可以相互补偿。如果初始三阶色散效应被脉冲展宽器完全补偿,剩余三阶色散效应对压缩脉冲宽度的影响很小,只轻微地增加了压缩脉冲的基底,且没有拖尾。

参 考 文 献

- 1 Terrance J. Kessler, Joachim Bunkenburg, Hu Huang *et al.*. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(6): 635~637
- 2 Zhao Bo, Hao Defu. Tiling to make large area diffraction grating [J]. *Optics and Precision Engng.*, 2000, **8**(5): 503~507
赵 博,郝德阜. 用拼接法获取大面积衍射光栅[J]. 光学精密工程, 2000, **8**(5): 503~507
- 3 T. J. Kessler, J. Bunkenburg, H. Huang. Grating array systems for the alignment and control of the spatial and temporal characteristics of light[P]. U. S. Patent Application, 10/836, 763, 2004-04-30
- 4 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Effect of tiling gratings errors on laser beam spatial distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 161~165 (in Chinese)
马雪梅,戴亚平,朱健强. 拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(2): 161~165
- 5 Zhongyang Wang, Zhizhan Xu, Zhengquan Zhang. A new theory for the treatment of a pulsed beam propagating through a grating pair[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **37**(1): 1~11
- 6 Wang Zhongyang, Xu Zhizhan. Theory of grating compressor in the case of finite beam size[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 151~159 (in Chinese)
王中阳,徐至展. 有限束宽下光栅对压缩的理论研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(2): 151~159
- 7 Oscar Eduardo Martinez. Pulse distortions in tilted pulse schemes for ultrashort pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1986, **59**(3): 229~232
- 8 Karoly Osvay, Ian N. Ross. On a pulse compressor with gratings having arbitrary orientation[J]. *Opt. Commun.*, 1994, **105**(3,4): 271~278
- 9 Zsolt Bor, Béla Rácz, Gabor Szabó *et al.*. Femtosecond pulse front tilt caused by angular dispersion[J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(10): 2501~2503
- 10 Angela N. Fantino, J. M. Simon. Pupil distortion in a system with two arbitrarily oriented plane gratings [J]. *J. Modern Optics*, 1992, **39**(4): 737~747
- 11 Tiejun Zhang, Motoki Yonemura, Yoshiaki Kato. An array-grating compressor for high-power chirped-pulse amplification lasers[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **145**(4): 367~376
- 12 Zhigang Zhang, Takashi Yagi. Evaluation of dispersion in a misaligned grating pair pulse compressor [J]. *Appl. Phys.*, 1995, **77**(2): 937~939
- 13 E. B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1969, **QE-5**(9): 454~458
- 14 C. Fiorini, C. Sauteret, C. Rouyer *et al.*. Temporal aberrations due to misalignments of a stretcher-compressor system and compensation[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(7): 1662~1670