有像差情况下的全息光栅拼接研究

钱国林[1,2] 吴建宏[1] 李朝明[1] 陈新荣[1] 邹文龙[1]

[1]苏州大学物理与光电·能源学部苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006

[2]苏州市职业大学电子信息工程学院, 江苏 苏州 215104

摘要 激光约束核聚变系统需要大口径脉冲压缩光栅。全息光栅拼接法是制造大口径光栅的重要手段。针对有像差的全息曝光系统,提出了一种拼缝处光栅对准拼接方法。为研究像差对光栅拼接特性的影响,用随机波面进行了光栅模拟拼接,计算了远场衍射能量分布与拼接误差的关系。实验拼接了(150+150)×200 mm^{2}口径光栅,其拼接均方根误差值为0.034λ,峰-峰误差值为0.110λ。利用光栅±1级衍射波面,计算得到了曝光系统像差,并模拟了拼缝处最小拼接误差,其均方根误差值为0.016λ,峰-峰误差值为0.105λ。结果表明,拼接误差与理论模拟结果相近。该误差不会造成远场衍射光斑能量明显下降。由此证明了该方法的可行性。

关键词 衍射光栅;拼接光栅;波像差;干涉条纹;脉冲压缩

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0305002

Study of Gratings Tiled by Holographic Exposure with Wave Aberration

Qian Guolin[1,2] Wu Jianhong[1] Li Chaoming[1] Chen Xinrong[1] Zou Wenlong[1]

[1]*Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu* 215006, *China*

[2]*College of Electronic Information Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou, Jiangsu* 215104, *China*

Abstract Large-aperture pulse compression gratings are needed by laser confinement fusion system. Tiled-grating made by holographic exposure is an important way to manufacture large aperture gratings. A method is proposed to align the gratings for the exposure system with wave aberration. In order to study the effect of the wave aberration on the characteristics of tiled-grating, the random wave fronts are used to simulate the tiled-gratings. The relationship between the distribution of far-field diffraction energy and the tiling-error is calculated. A grating of (150+150)×200 mm^2 is made experimentally. The root-mean-square value of the tiling-error is 0.034λ and the peak to peak value is 0.110λ. The ± 1st diffraction wave fronts of the grating are used to calculate wave aberration of the exposure system. The minimum value of the tiling-error is simulated theoretically. The root-mean-square value of the error is 0.016λ and the peak to peak value is 0.105λ. The results show that the tiling-error is close to the simulated data. The far-field diffraction intensity can not be decreased obviously by the tiling-error. It is proved that the method proposed in this article is feasible.

Key words diffraction grating; tiled-grating; wave aberration; interference fringe; pulse compression

OCIS codes 050.1950; 320.5520; 120.3180; 230.1950

收稿日期: 2014-09-17; **收到修改稿日期**: 2014-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(61178046,60808013)、江苏省高校自然科学研究重大项目(11KJA14001)、江苏高校优势学科建设工程资助项目、苏州市应用基础研究项目(SYG201115)

作者简介: 钱国林(1980—),男,博士研究生,讲师,主要从事光信息器件与微纳制造方面的研究。E-mail: qgl_jy@jssvc.edu.cn

导师简介: 吴建宏(1960—),男,博士,教授,主要从全息学及光信息处理方面的研究。E-mail: jhwu@suda.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

衍射光栅是啁啾脉冲压缩激光系统中的重要光学元件[1-2]。为提高激光输出，使其满足惯性约束核聚变需求，其脉冲压缩系统需要使用大口径衍射光栅[3-4]，但是大口径脉冲压缩光栅的制造难度和费用很高。拼接光栅是替代单口径大光栅的一种途径[5-9]，但是它对拼接精度和机械稳定性有较高的要求。全息光栅拼接法将拼接光栅使用时的调节难度转移到光栅制造过程中，可简化强激光系统的复杂性。国内已有研究机构利用全息曝光系统成功实现了光栅拼接[10-12]。但是目前能够制造的全息拼接光栅面积较小，也没有考虑光栅拼接系统的像差问题，相对工程应用而言还有一定距离。在大口径全息光栅拼接过程中，像差有可能导致光栅拼接精度下降，以致光栅远场衍射光斑能量下降。为了能够在有像差的全息曝光系统中制造拼接光栅，本文设计了一种有像差情况下的光栅拼接方案，通过实验获得了较大面积衍射光栅。

2 有像差情况下的全息光栅拼接法

全息光栅拼接是在同一块光栅基片上依次进行全息曝光，将对称相干光束形成的光场光栅记录到基片，使其表面形成多套光栅条纹。图1所示为基片被两次全息曝光后形成的光栅条纹，d_{1x}、d_{2x}分别为光栅G_1和G_2沿x轴方向周期，$\Delta\theta$为两光栅间夹角，Δx为两光栅间距。光栅拼接要求$d_{1x}=d_{2x}$，$\Delta\theta=0$，$\Delta x=N\times d_{1x}$，N为整数。曝光完成第一块光栅G_1后需要移动光栅基片，使待曝光区域G_2进入曝光场，如此必将导致三个拼接参数产生误差。利用潜像光栅检测法[11]和参考光栅检测法[12]均可实现对光栅拼接误差检测。其基本原理[11-12]是使曝光场通过光栅基片后形成数条干涉条纹，利用该条纹的倾斜度、周期和相位变化来检测基片表面光栅与光场光栅之间的周期、倾斜度和相位误差。由于潜像光栅法利用拼接光栅自身作为参考光栅来检测拼接参数误差，所以其检测效果更佳。但不管采用哪种方式，在曝光系统有像差的情况下，基片记录光栅条纹均有一定的扭曲。曝光场通过光栅后形成的干涉条纹也有相应的扭曲。因此无法使实时干涉条纹与参考干涉条纹完全对准。设全息曝光系统像差为

$$w(x,y)=k\cdot\frac{w_0(x,y)}{\max[w_0(x,y)]-\min[w_0(x,y)]},\tag{1}$$

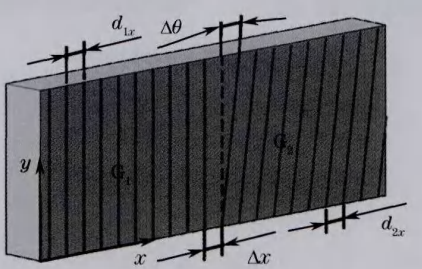


图1 拼接光栅示意图

Fig.1 Sketch of tiled-grating

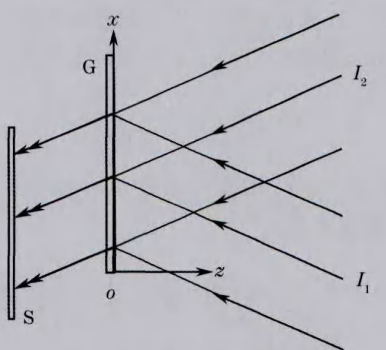


图2 对称光路示意图

Fig.2 Sketch of symmetric optical path

式中 $w_0(x,y)=A_1(x^2+y^2)^2+A_2y(x^2+y^2)+A_3x(x^2+y^2)+A_4y^2+A_5x^2+A_6xy$ [13]，其中 A_1 为球差系数，A_2、A_3 为慧差系数，A_4、A_5、A_6 项为像散系数，k 为像差峰谷（PV）值。如图2所示光栅 G_1 条纹是由对称相干光束 I_1 和 I_2 曝光形成，光栅 G_1 和 G_2 沿 x 轴方向宽度均为 L，沿 y 轴方向高度为 H。设一束理想大口径平面波沿 I_1 方向入射至拼接光栅 G 表面时的振幅为1，光栅 G_1 和 G_2 产生的+1级衍射波面表达式为

$$U_{+1}=\begin{cases}\exp\left\{\mathrm{j}\cdot 2\pi\left[\dfrac{x}{d_{1x}}+w(x,y)\right]\right\}, & 0\leqslant x<L\\ \exp\left\{\mathrm{j}\cdot\left\{2\pi\left[\dfrac{x}{d_{2x}}+\dfrac{y}{d_{2y}}+w(x-L,y)\right]+\Delta\varphi\right\}\right\}, & L\leqslant x\leqslant 2L\end{cases},\tag{2}$$

式中 $w(x,y)$ 为相干光束 I_1 和 I_2 的波面差值，即曝光系统像差，d_{2y} 为 G_2 沿 y 轴方向周期，倾斜度误差 $\Delta\theta\approx d_{2x}/d_{2y}$，相位误差 $\Delta\varphi=2\pi\cdot\mathrm{mod}(\Delta x/d_{1x})$。当 $w(x,y)=0$ 时，$d_{2x}=d_{1x}$，$d_{2y}=\infty$，$\Delta\varphi=0$，则拼接光栅+1级衍射波面为理想平面波。当 $w(x,y)\neq 0$ 时，$d_{2x}=d_{1x}$，$d_{2y}=\infty$，$\Delta\varphi=0$，拼接光栅 +1 级衍射波面像差如图3(a)所示。该波面是根据(1)式模拟所得随机像差，其中 $k=0.27\lambda$，λ 为入射光波长，像差系数 $A_1=0.124$，$A_2=0.218$，$A_3=-0.445$，$A_4=-0.126$，$A_5=0.235$，$A_6=-0.472$，每个初级像差项 $A_i f(x,y)\in(0,0.27\lambda)$。该波面在位置 $x=L$ 处不连续，其误差均方根值 e_{RMS} 为

$$e_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\sum_{j=1}^{M}[w_1(x_{1N},y_j)-w_2(x_{21},y_j)]^2\Big/M},\tag{3}$$

式中 $w_1(x,y)$ 为光栅 G_1 的+1级衍射波面，$x_{1N}=L$，$w_2(x,y)$ 为光栅 G_2 的+1级衍射波面，$x_{21}=L+\dfrac{L}{N}$，N 为沿 x 方向的采样点数量，M 为沿 y 方向的采样点数量。拼缝两侧波面峰-峰误差定义为

$$P_{\max}=\max[w_1(x_{1N},y)-w_2(x_{21},y)].\tag{4}$$

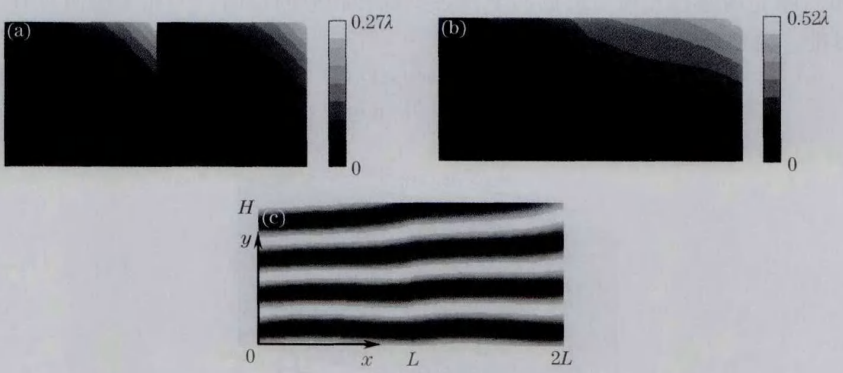


图3 拼接光栅误差示意图。(a) 衍射波面；(b)优化过的衍射波面；(c)干涉条纹

Fig.3 Diagrams of tiled-grating error. (a) Diffraction wave front; (b) optimized diffraction wave front; (c) interference fringes

如果对拼接误差 $\Delta\theta$ 和 Δx 作适当微调，即微调(2)式中 d_{2y} 和 $\Delta\varphi$，可以使 $x=L$ 处波面误差 e_{RMS} 最小，图3(b)为优化后的衍射波面。其优化标准是通过计算机程序调节右侧波面的相位和倾斜度使(3)式为最小值。设一束理想平面波沿 I_2 方向入射至基片表面，其振幅为1且 y 方向相位受到均匀调制。其0级衍射波面表达式为

$$U_0=\exp\left\{\mathrm{j}\cdot\left[2\pi\cdot\left(\frac{x}{d_x'}+\frac{y}{d_y'}\right)+\varphi'\right]\right\},\tag{5}$$

式中 $1/d_x'$ 为光束沿 x 轴方向余弦，$1/d_y'$ 为沿 y 轴方向余弦，φ' 为相位。0级衍射光和+1级衍射光在图2所示荧光屏 S 上形成一套干涉条纹，其光强表达为

$$I=|U_{+1}+U_0|^2=\begin{cases}2+2\cos\left\{2\pi\left[w(x,y)+\dfrac{x}{d_{1x}}-\dfrac{x}{d_x'}-\dfrac{y}{d_y'}\right]-\varphi'\right\}\\ 2+2\cos\left\{2\pi\left[w(x-L,y)+\dfrac{x}{d_{2x}}-\dfrac{x}{d_x'}+\dfrac{y}{d_{2y}}-\dfrac{y}{d_y'}\right]+\Delta\varphi-\varphi'\right\}\end{cases}.\tag{6}$$

根据(6)式，当 $d_x' = d_{1x}, d_y' = H/4$ 时，模拟得到图3(b)波面对应的全口径干涉条纹，如图3(c)所示。拼缝处的干涉条纹基本保持连续。

为研究一般情况下全息光栅拼接误差，根据(1)式对不同像差种类的全息曝光波面进行模拟，得到了500组PV值为0.27λ的随机波面，并利用前述方法对这些波面进行优化对准拼接，得到了拼缝处相位误差均方根值 e_{RMS} 和峰-峰值 P_{max}，其统计量见表1。结果说明曝光系统有像差时，可通过微调 $\Delta\theta$ 和 Δx 使光栅衍射波面在拼缝处保持较好的连续性。由于干涉条纹的扭曲因像差而产生，不同种类的像差，干涉条纹的扭曲情况也不一样。当曝光系统像差增加时，会导致拼接相位误差增加。此处仅模拟初级像差，并未考虑实际光学系统中的高级像差。

表1 拼缝处波面相位误差

Table 1 Phase error of wave front at tiling-gap

Statistical category	e_{RMS}/λ	P_{max}/λ
Average value	0.0064	0.0141
Maximum value	0.0183	0.0403
Minimum value	0.0001	0.0002

当拼接处相位误差发生整体偏移时，光栅衍射波面远场光斑峰值将发生变化。对500组波面进行模拟拼接后得到表2所示统计数据。定义拼接处相位误差均方根值 e_{RMS} 最小时远场光强峰值为100%，则随着相位误差增加，远场衍射光强峰值随之减小。从统计数值趋势来看，如要求远场光斑峰值比大于95%，那么要求拼接过程引入的整体相位偏差小于0.15λ。相比无像差系统，该光栅拼接容限稍大[14]。

表2 远场衍射光强峰值

Table 2 Peak intensity of far-field diffraction

Phase error /λ	0	0.05	0.10	0.15	0.20
Peak value /%	100	99.5	98.0	95.7	92.1

为进一步验证实际波面像差对拼接精度的影响，实验上曝光系统像差可以通过干涉仪测量光栅-1级衍射波面 $w_{-1}(x,y)$ 和+1级衍射波面 $w_{+1}(x,y)$ 得到。实际上正、负1级衍射波面包含了光栅基片面形引入的像差 $w_0(x,y)$，测量所得光栅衍射波像差与基片面形及测量波长有关，$w_{+1}(x,y) = w(x,y) + w_0(x,y)$，$w_{-1}(x,y) = -w(x,y) + w_0(x,y)$。曝光系统像差为

$$w(x,y) = [w_{+1}(x,y) - w_{-1}(x,y)]/2. \tag{7}$$

根据(7)式所得系统像差与干涉仪测量光波长无关[15]。根据(3)式可得拼缝处光栅拼接误差可将光栅基片面形引入的像差消除，所以光栅拼接误差与干涉仪测量波长也无关。

3 实验及其结果

光栅拼接实验中所用氪离子激光器波长为413.1 nm，光栅周期 d=1/1740 mm，按第2节所述方法进行光栅对准拼接。制造完光栅 G_1 后通过检测系统得到如图4(a)所示参考干涉条纹。沿 x 轴负方向移动光栅基

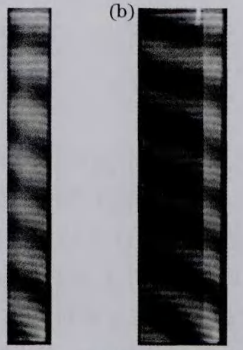


图4 干涉条纹。(a)参考条纹；(b)实时条纹

Fig.4 Interference fringes. (a) Reference fringes; (b) real time fringes

37

片，调节拼接参数使检测系统显示的实时干涉条纹与参考干涉条纹对准。由于像差的存在，干涉条纹产生扭曲，无法使实时干涉条纹与参考干涉条纹完全对准。根据(3)式，计算两套干涉条纹波谷位置差的均方根值，以其最小值为标准进行条纹对准。如图4(b)左侧为实时干涉条纹，右侧为参考干涉条纹。此时曝光场形成的待拼接光栅 G_2 与光栅 G_1 之间的偏差最小，可以制造第二块光栅 G_2。

完成(150+150)×200 mm^{2}口径光栅制造后，用瞿柯莱姆达(Zygo Lamda)干涉仪测量第一块光栅 G_1 的±1级衍射波面。根据(7)式，利用Matlab软件计算得到全息曝光系统像差如图5所示，在150 mm×200 mm区域内像差PV值为0.27λ。

图6所示为拼接光栅+1级衍射波面，拼缝两侧波面拼接误差并不明显。将衍射波面数据导入Matlab软件计算得到拼缝两侧波面误差如图7所示，其均方根值为0.034λ，说明光栅拼接误差较小。拼缝处波面相位峰-峰误差为0.110λ，主要由曝光系统局部大像差造成。根据(3)式对衍射波面进行优化，得到拼缝处波面误差如图8所示，其均方根值为0.016λ，峰-峰值为0.105λ。该值略小于实际波面误差。图7与图8的高度相似性说明全息光栅曝光拼接法无法抑制局部像差对光栅衍射波面误差的影响。对于初级像差而言可以通过光栅拼接参数微调来进行优化补偿，而局部波像差是无法通过补偿优化来进行消除。剔除像差原因拼接过程引入均方根误差值仅有0.018λ。根据表2统计结论可得，该误差对远场光斑能量下降的影响非常有限。

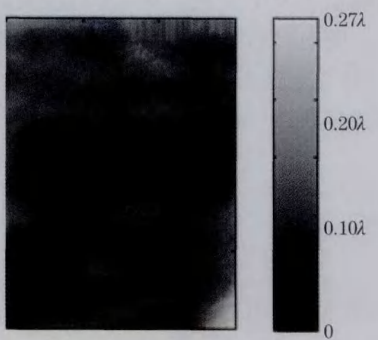


图5 曝光系统波像差

Fig.5 Wave aberration of exposure system

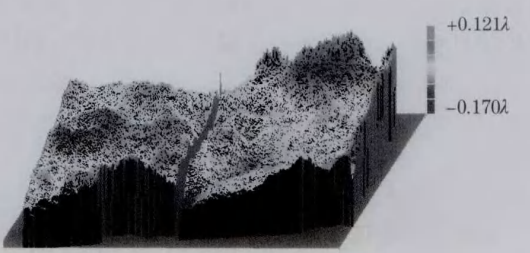


图6 拼接光栅衍射波面

Fig.6 Diffraction wave front of tiled-grating

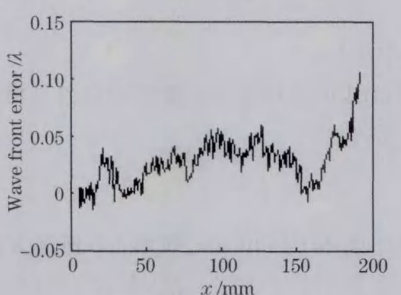


图7 衍射波面误差

Fig.7 Error of diffraction wave front

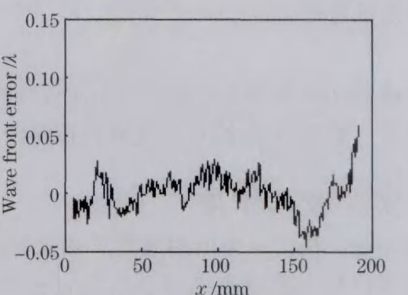


图8 优化过的衍射波面误差

Fig.8 Error of optimized diffraction wave front

4 结 论

大口径全息曝光系统一般存在波像差，用该类系统进行曝光拼接时，用于检测拼接误差的干涉条纹会发生扭曲，针对这一工程技术问题提出了一种光栅拼缝处均方根对准拼接方法。利用该方法，在有像差的曝光系统中实现了较大面积光栅拼接。光栅拼缝处+1级衍射波面误差结果和衍射波面优化处理结果表明，在有像差的全息曝光系统中进行光栅拼接时，光栅拼接误差与系统像差特征相关。光栅拼接模拟和实验均证实拼接处光栅衍射波面相位误差是无法避免的。光栅拼接实验过程中会造成光栅衍射波面相位误差的增加，但其增加量较小，对光栅远场衍射光强能量分布不会产生明显的影响。

参考文献

1 E Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1969, 5(9): 454-458.

2 Wang Yanhai, Liu Guocai, Yang Qingwei, *et al*.. Three dimensional OPCPA numerical simulations for a petawatt class laser system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 071404.
王艳海, 刘国才, 杨庆伟, 等. 用于拍瓦级激光系统的三维光参量啁啾脉冲放大的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 071404.

3 T Jitsuno, S Motokoshi, T Okamoto, *et al*.. Development of 91 cm size gratings and mirrors for LEFX laser system [C]. Journal of Physics Conference Series, 2008, 112(3): 032002.

4 Li Fuquan, Han Wei, Wang Fang, *et al*.. Research status of final optics assembly in high-power laser facility [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060002.
李富全, 韩 伟, 王 芳, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060002.

5 J Qiao, A Kalb, T Nguyen, *et al*.. Demonstration of large-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt-class, chirped-pulse amplification systems [J]. Opt Lett, 2008, 33(15): 1684-1686.

6 T J Kessler, J Bunkenburg, H 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.

7 J Qiao, A Kalb, M J Guardalben, *et al*.. Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems [J]. Opt Express, 2007, 15(15): 9562-9574.

8 Zhaoyang Li, Tao Wang, Guang Xu, *et al*.. Research on potential problems of object image grating self-tiling for applications in large aperture optical systems [J]. Appl Opt, 2013, 51(23): 5627-5632.

9 Jiang Shan, Bayanheshing, Li Wenhao, *et al*.. Effect of period setting value on printed phase in scanning beam interference lithography system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0905003.
姜 珊, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 扫描干涉场曝光系统中周期设定对曝光刻线相位的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0905003.

10 Li Chaoming, Wu Jianhong, Chen Xinrong, *et al*.. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression mosaic grating [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1943-1946.
李朝明, 吴建宏, 陈新荣, 等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1943-1946.

11 Shi Lei, Zeng Lijiang, Li Lifeng. Fabrication of optical mosaic gratings with phase and attitude adjustments employing latent fringes and a red-wavelength dual-beam interferometer [J]. Opt Express, 2009, 17(24): 21530-21543.

12 Qian Guolin, Li Chaoming, Chen Xinrong, *et al*.. Error analysis of holographic mosaic gratings[J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 747-751.
钱国林, 李朝明, 陈新荣, 等. 全息拼接光栅的误差研究[J]. 激光技术, 2013, 37(6): 747-751.

13 Yu Meiwen. Optical Holography and Its Application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.89.
于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 89.

14 Zhao Bo, Qi Xiangdong. Analysis and computing for the phase matching of diffraction gratings [J]. Optical Technique, 2000, 26(5): 385-387.
赵 博, 齐向东. 衍射光栅位相拼接的计算分析[J]. 光学技术, 2000, 26(5): 385-387.

15 Zhang Wei, Wu Jianhong, Zhu Jianqiang, *et al*.. New method to regulate light path of pulse compression grating [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1609-1613.
张 伟, 吴建宏, 朱健强, 等. 脉冲压缩光栅光路调节新方法研究[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1609-1613.

栏目编辑: 史 敏

3P