

文章编号: 1001-3806(2014)02-0225-05

大口径拼接压缩光栅波像差研究

魏江¹, 吴建宏^{2*}

(1. 常熟理工学院 物理与电子工程学院, 常熟 215500; 2. 苏州大学 信息光学工程研究所, 苏州 2150061)

摘要: 为了研究大口径拼接压缩光栅的固定像差和随机像差对光学拼接的影响, 采用数值模拟的方法, 理论分析了参考光栅的衍射光斑特性。在有效判据的基础上, 得到了光栅的拼接精度。结果表明, 当拼接子光栅的波像差为 1.0λ 时, 其最大拼缝偏差约为 0.26 个光栅周期, 采取人工干预后, 最大拼缝偏差增加到 0.42 个光栅周期。与此同时, 最大角度偏差约为 $0.71\mu\text{rad}$, 两种特性参量均比无像差时的拼接要求大幅度降低。这一结果对高能皮秒激光装置的改进有一定的积极意义。

关键词: 激光光学; 拼接光栅; 波像差; 远场衍射; 拼缝偏差; 角度偏差

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.02.017

Study on wave aberration of large-aperture mosaic compression grating

WEI Jiang¹, WU Jianhong²

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China; 2. Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: In order to analyze the effects of fixed and random wave aberration on the large-aperture mosaic compression gratings, by numerical simulation, the far-field characteristics for referenced gratings were studied. On the basis of the precise evaluation criterion, the tiling accuracy of the mosaic gratings was obtained. The results showed that the maximum piston error of the tiling precision was about 0.26 grating period when the wave aberration of sub-gratings was 1.0λ . After manual intervention, the maximum piston error was about 0.42 grating period and the maximum tip-tilt error was $0.71\mu\text{rad}$ approximately, which were both lower than before. The research is benefit for the improvement of high energy picosecond laser device.

Key words: laser optics; tiling grating; wave aberration; far-field diffraction; piston error; tip-tilt error

引言

压缩光栅是啁啾脉冲放大系统的核心元器件, 其作用是将能量放大、展宽后的脉冲压缩回原来的宽度, 使其重新恢复为超短脉冲。系统产生的高能脉冲能达到皮秒级^[1-2], 这一激光装置可用于研究惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)的高功率激光驱动器, 其作用是在实验室条件下产生高能激光, 从而驱动热核聚变。在惯性约束核聚变快

点火方面, 需要在皮秒甚至飞秒激光脉宽内输出几十至几百千焦激光能量, 这要求脉冲压缩系统中的产生超短激光脉冲的光栅宽度将达到米级, 目前多采用损伤阈值较高的多层介质膜光栅^[3]。通过前期工作的研究, 对现有通过光学拼接法^[4-5]获得大口径光栅的研究仅局限于无波像差的理想光栅^[4-7]或仅考虑单一像差对光栅的影响^[8], 如针对光栅存在球差、彗差、像散中任一种像差时, 结合一定评价判据, 得到了拼接过程中需要达到的拼接精度。如彗差为 0.5λ 时, 结合具体的光栅尺寸, 从定域内能量改变的角度分析, 对最大拼缝偏差约为 $0.42d$ (d 为光栅周期), 最大角度偏差约为 $0.52\mu\text{rad}$, 均比无像差时的拼接要求有所降低。然而实际像差并不单纯由单一像差组成, 它是一个综合像差, 研究综合像差对光栅的影响更具有现实性。为此, 本文中以高能皮秒激光装置中需要的脉冲压缩光栅的实际尺寸

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178046); 江苏省高校自然科学研究重大基础研究资助项目(11KJA140001)

作者简介: 魏江(1971-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光栅拼接方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jhwu@suda.edu.cn

收稿日期: 2013-07-22; 收到修改稿日期: 2013-08-21

为例,在分析理想光栅拼接的基础上进一步研究了综合像差对远场光斑性能的影响,提出了和现有技术水平相适应的拼接要求,其结果将对其中的激光装置具有实际指导意义,并能在一定程度上提高系统的实用性。

1 理论模型

用全息曝光法制作的拼接光栅压缩器如图 1 所示,其中光栅 G_1 和 G_2 为通过平移曝光法得到的拼接光栅(栅线方向分别垂直于 y_1 轴和 y 轴),系统由子光栅 G_{11}, G_{21} 和 G_{12}, G_{22} 两对压缩器组成。平行光入射光栅 G_1 后,其一级衍射光作为入射光分别射入子光栅 G_{21}, G_{22} ,光栅衍射光在凸透镜 L 的焦点 P 点处形成一光斑。

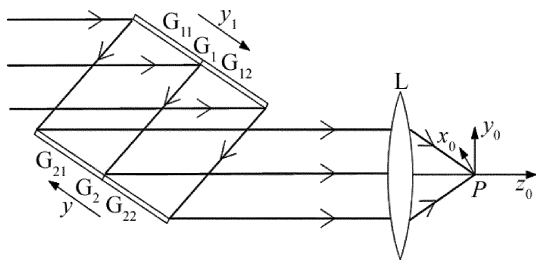


Fig. 1 Optical route of the large-aperture mosaic grating-pair compressor

拍摄全息光栅时,当子光栅存在像差时,对远场光强分布将产生影响。像差取如下形式^[9]:

$$W(x, y) = A(x^2 + y^2)^2 + B y(x^2 + y^2) + C x(x^2 + y^2) + D y^2 + E x^2 + F(x^2 + y^2) + G x y \quad (1)$$

式中,第 1 项为球差,第 2 项和第 3 项为彗差,第 4 项,第 5 项和第 7 项为像散,第 6 项为离焦, A, B, C, D, E, F, G 分别是各自项的系数。由于大口径光学系统自身具有检焦和调焦能力^[10],外场检测和评估大口径光学系统综合像差时,对于离焦像差可不予考虑。本文中仅考虑球差、彗差、像散综合分布在每个子光栅的像差项中,将像差(1)式代入相应入射波面反射率函数得^[11]:

$$t_i(x, y) = t_0(x, y) \exp[j2\pi W_i(x, y)] \quad (2)$$

式中, $t_0(x, y)$ 代表不考虑像差前的子光栅反射率函数, $W_i(x, y)$ 代表子光栅各自的像差,下标 i 分别代表 G_{11}, G_{21}, G_{12} 和 G_{22} 4 块子光栅。全息曝光法制作光栅的过程中像差的产生主要由两方面决定,根据产生来源可以分为固定像差和随机像差。其中固定像差(由 W_1 表示)来自于全息光栅的制作过程中,如光路的调节、平凸透镜的加工精度和折射率等

因素带来的误差;随机像差(由 W_2 表示)的大小主要由基片自身的面形决定。固定像差 W_1 与随机像差 W_2 在总像差 W (简称像差)中的分布满足统计规律,总像差 W 为:

$$W = \sqrt{W_1^2 + W_2^2} \quad (3)$$

在现有实验条件下,若总像差 $W = 1.0$,每块光栅基片误差引起的随机像差 $W_2 \approx 0.4$ 。本文中根据像差产生的原因不同,将它分成 4 种可能方案,分析不同情况对远场和拼接精度的影响。

(1) 方案一:子光栅的固定像差和随机像差均相同。对应为考虑光栅在制作过程中光路稳定,即固定像差相同,同时基片的随机像差相同。

(2) 方案二:子光栅的固定像差相同,随机像差不同。对应为考虑光栅在制作过程中光路稳定,但是基片的来源不同。

(3) 方案三:子光栅的固定像差不同,随机像差相同。对应为考虑光栅在制作过程中光路调节不稳定,但基片的随机像差相同。

(4) 方案四:子光栅的固定像差和随机像差均不相同。对应为考虑光栅在制作过程中光路调节不稳定,同时基片间的偏差也不可忽略。

2 拼接压缩光栅的远场

当两对子光栅满足共面且栅线相互平行时,如果忽略拼缝偏差对远场光强的影响^[12],用 MATLAB 模拟出大口径拼接光栅压缩器的远场参量。光栅参量见表 1。其中, S 为光栅尺寸, d 为光栅周期, α 是入射角度, λ 是入射光波长, f 为凸透镜的焦距, L 是两压缩光栅对之间的距离。为满足 ICF 点火条件,子光栅的波像差必须控制在一定的范围内,在此假设每一块子光栅的像差为 1.0λ 。

Table 1 Parameters of mosaic compression grating

S/mm^2	d/mm	$\alpha/(\text{°})$	λ/nm	f/mm	L/mm
600 × 350	1/1740	64	1053	5000	5000

2.1 拼缝偏差对远场的影响

文中拼缝偏差 ΔL 是指待拼接的两对子光栅拼缝改变量之差,理想拼接对拼缝偏差的要求是满足光栅周期的整数倍。由于远场光斑随拼缝偏差呈周期性变化,周期为 $0.5d$,因此,仅讨论拼缝偏差在 $(0 \sim 0.5d)$ 范围内变化时的远场情况。

本文中从以下 4 个方面^[8]分析远场光斑随拼缝偏差的变化情况:(1)取无拼缝偏差理想拼接时远场光斑 80% 的中心区域能量为总光能,存在拼缝偏

差时,相同面积内的能量与总光能的比值为 E (本文中取归一化);(2)远场光斑的尺寸称为半径 R ;(3)远场光斑的最大光强 I_{\max} (归一化);(4)拼缝偏差变化时的远场光斑与无拼缝偏差时远场光斑的相关系数 γ 。

比较理想拼接 ($W = 0$) 和像差为方案一 ($W = 1.0\lambda$) 时,拼缝偏差对远场参量 E, R, I_{\max} 和 γ 的影响,如表 2 所示。由表 2 中的数据可以发现:(1)能量比例系数 E 随拼缝偏差的增加而降低,相比理想拼接,在光栅存在 $W = 1.0\lambda$ 的像差后,定域内能量降低很快,这是由像差导致远场光斑扩散造成的,但是相对有像差和理想拼接时能量比例系数的变化情况,有像差时定域内能量变化比较平缓,在拼缝偏差变化范围内,前者数据减小 7.9%,而后者数据减小达到 34%;(2)衍射光斑尺寸 R 随拼缝偏差的增大

而逐渐变大,在考虑光栅像差后,在一定范围内像差对光斑半径有补偿作用,如 ΔL 在 $0.05d \sim 0.25d$ 变化时,光斑半径的数值随拼缝的增大而减小,在拼缝偏差变化范围内且有像差时,光斑半径 R 的数值增加了 0.018%,理想拼接时这一数值达到 19%;(3)远场光斑的最大光强 I_{\max} 随着拼缝偏差 ΔL 的增大而降低,由数据可以看出,有像差时,在一定拼缝偏差变化范围内,像差对光强极值有补偿作用;相比有像差和理想拼接时最大光强的变化情况,随拼缝偏差的增加,前者数据下降约 28%,后者数据下降近 50%;(4)随着拼缝偏差的增加,表明图像相似程度的相关系数 γ 减小。比较有像差和理想拼接时的两组数据发现:像差对相关系数的变化影响不大,前者的变化稍快于后者。

Table 2 Diffraction pattern characteristic parameters changing with the piston error

$\Delta L/d$	E (normalized)		$R/\mu\text{m}$		I_{\max} (normalized)		γ	
	$W = 0$	$W = 1.0\lambda$	$W = 0$	$W = 1.0\lambda$	$W = 0$	$W = 1.0\lambda$	$W = 0$	$W = 1.0\lambda$
0.00	1.000	0.2253	2.243	5.396	1.000	1.000	1.000	1.000
0.05	0.9921	0.9960	2.249	5.374	0.9755	0.9158	0.9870	0.9821
0.10	0.9761	0.9893	2.277	5.354	0.9045	0.7939	0.9482	0.9302
0.15	0.9540	0.9805	2.323	5.338	0.7939	0.8782	0.8869	0.8491
0.20	0.9389	0.9703	2.382	5.328	0.6545	0.9645	0.8050	0.7467
0.25	0.9137	0.9600	2.448	5.324	0.6509	1.007	0.7081	0.6328
0.30	0.8728	0.9503	2.514	5.327	0.6912	1.001	0.6042	0.5233
0.35	0.8315	0.9418	2.574	5.338	0.6878	0.9476	0.5020	0.4154
0.40	0.7858	0.9365	2.623	5.354	0.6609	0.8519	0.4150	0.3332
0.45	0.7189	0.9339	2.656	5.374	0.5999	0.8039	0.3552	0.2804
0.50	0.6625	0.9210	2.670	5.397	0.5141	0.7234	0.3340	0.2620

2.2 角度偏差对远场的影响

全息法进行光栅拼接时,子光栅间的角度偏差(面内角度偏差) $\Delta\theta_z$ 的变化也将影响远场光斑。与第 2.1 节中相类似,从 4 个方面分析远场参量随面内角度偏差的变化情况,数据见表 3。分析表中

数据可知,随着 $\Delta\theta_z$ 的增加,远场的能量比例系数 E 降低、光斑半径 R 增大、最大光强 I_{\max} 降低、相关系数 γ 减小;相对有像差和无像差两种情况,3 种参量 E, R 和 I_{\max} 变化趋势的快慢程度均不同,像差对相关系数 γ 的影响不明显。

Table 3 Diffraction pattern characteristic parameters changing with the tip-tilt error

$\Delta\theta_z/\mu\text{rad}$	E (normalized)		$R/\mu\text{m}$		I_{\max} (normalized)		γ	
	$W = 0$	$W = 1.0\lambda$	$W = 0$	$W = 1.0\lambda$	$W = 0$	$W = 1.0\lambda$	$W = 0$	$W = 1.0\lambda$
0	1.000	1.000	2.243	5.396	1.000	1.000	1.000	1.000
0.164	0.9962	1.042	2.277	5.393	0.9839	0.9900	0.9949	0.9957
0.328	0.9851	0.9884	2.328	5.391	0.9535	0.9616	0.9807	0.9827
0.493	0.9663	0.9734	2.368	5.394	0.9238	0.9348	0.9570	0.9614
0.657	0.9387	0.9512	2.403	5.402	0.8770	0.8976	0.9266	0.9320
0.821	0.9021	0.9223	2.439	5.419	0.8063	0.8405	0.8878	0.8954
0.985	0.8568	0.8864	2.465	5.443	0.7271	0.7674	0.8452	0.8522

3 拼接要求

考虑到压缩光栅的拼接效果,定义能量比例系数 E 下降 5%、光斑半径 R 增大 5%、远场光斑的最大光强 I_{\max} 和相关系数 γ 减小 10% 作为有效拼接的判据。由于拼接误差对远场的累积效应,对于子光栅的要求是拼接容限的 $1/\sqrt{2}$,在这一基础上从衍射光斑的 4 个特性参量出发对每对子光栅的拼接偏差加以分析,将得到相应的拼接要求。因为理论模型中像差存在的 4 种可能方案,将理想拼接和考虑像差不同情况时对子光栅的拼缝偏差和角度偏差的要求(即最大偏差)总结于表 4 中(其中拼缝偏差单位为光栅周期 d 、角度单位为 μrad)。

Table 4 The maximum error in the mosaic grating with wave aberration

aberration		maximum intensity	spot radius	energy ratio coefficient	correlation coefficient
ideal	$\Delta L/d$	0.06	0.15	0.12	0.12
	$\Delta\theta_z/\mu\text{rad}$	0.41	0.32	0.50	0.59
case 1	$\Delta L/d$	0.36	0.5	0.25	0.10
	$\Delta\theta_z/\mu\text{rad}$	0.52	>1.0	0.55	0.61
case 2	$\Delta L/d$	0.35	0.5	0.24	0.10
	$\Delta\theta_z/\mu\text{rad}$	0.52	>1.0	0.62	0.63
case 3	$\Delta L/d$	0.34	0.5	0.24	0.09
	$\Delta\theta_z/\mu\text{rad}$	0.51	>1.0	0.63	0.62
case 4	$\Delta L/d$	0.36	0.5	0.26	0.08
	$\Delta\theta_z/\mu\text{rad}$	0.51	>1.0	0.64	0.61

为了更准确、更直观地了解数据,根据表 4,从拼缝偏差和角度偏差两方面绘制出 4 种方案的结论如图 2 和图 3 所示(表 4 中的角度偏差最大大于 $1.0\mu\text{rad}$,为了方便,图 2 中仅表示为 $1.0\mu\text{rad}$)。

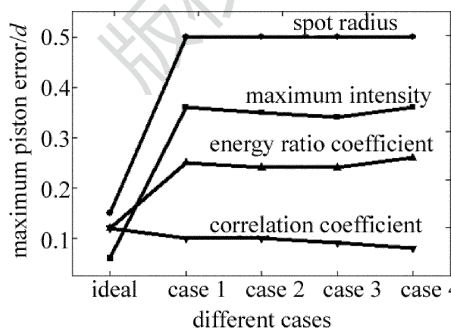


Fig. 2 The maximum piston error in the mosaic grating with wave aberration

表 4、图 2 和图 3 说明,考虑子光栅的 1.0λ 的波像差后,从衍射光斑尺寸、能量变化、最大光强的角度分析,对拼缝偏差和最大角度偏差的要求均比无像差时有所降低。如观察最大光强随拼缝的变化

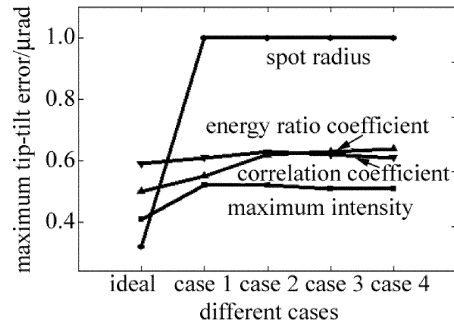


Fig. 3 The maximum tip-tilt error in the mosaic grating with wave aberration

曲线,要求的最大偏差为 $0.36d$,远大于理想拼接时的 $0.06d$;从定域内能量改变的角度分析,要求的最大拼缝偏差为 $0.25d$,远大于理想拼接时的 $0.12d$ 。同时也发现虽然实际基片的像差中球差、慧差、像散的组成不同(每种情况各取 5 种组合,数据不再展示),但是对于相同的 1.0λ 的 4 种方案的波像差,不同的组成对拼接要求基本一致,如从定域内能量改变的角度分析,不同方案的最大拼缝偏差均为 $0.25d$ 左右。类似的结论也可以从表 4 和图 3 中得出。

4 人工干预

观察像差公式(1)式可知,波像差中轴向部分(球差和像散)为 (x, y) 的偶函数,垂轴部分(慧差)为 (x, y) 的奇函数,因此在压缩的过程中随着光栅面坐标 (x, y) 符号的改变,像差中垂轴部分将相互抵消,相当于人为减少了光栅像差的影响。具体做法是将用全息曝光法制作的第 2 块光栅绕栅线人为转动 $\theta = \pi$ 角度,其中光栅面内坐标变化为 $x' = x\cos\theta + y\sin\theta, y' = y\cos\theta - x\sin\theta$,观察经压缩后像差对远场光斑的影响。为了对比人工干预前后光斑随拼缝偏差和角度偏差的变化情况,将方案四中的光栅人为转动 π 角度,从光斑特性的 4 个方面对每对子光栅的拼接要求进行模拟计算。对比分析人工干预前后和理想拼接 3 种情况下衍射光斑定域内能量比例系数随拼缝偏差和角度偏差的变化,结果如图 4 和图 5 所示(其中干预前的像差 $W = 1.0\lambda$,干预后像差 $W' = 1.0\lambda$,理想拼接时 $W = 0$)。

图 4、图 5 均表明,比较人工干预前后像差对远场的影响,发现在相同的拼接要求和像差不变的前提下,每对光栅的拼接允许误差也在增加。根据图 4,当 $W' = 1.0\lambda$ 时人工干预后,拼缝误差应控制在 $0.42d$ 左右,这一拼接要求明显低于理想拼接的

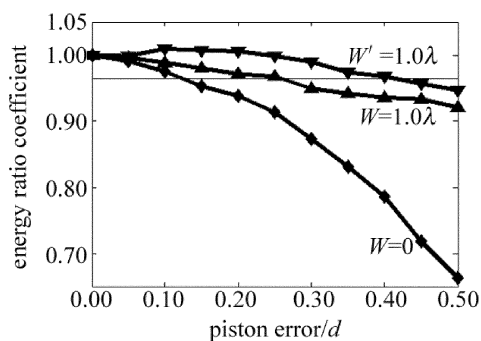


Fig. 4 Relationship between the piston error and the energy ratio coefficient in different cases

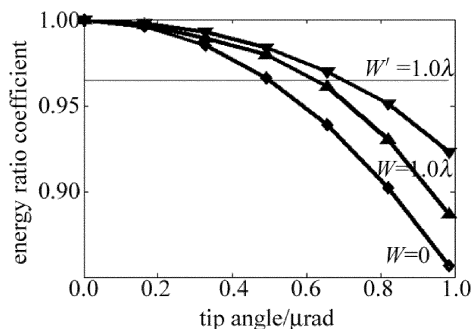


Fig. 5 Relationship between the tilt angle and the energy ratio coefficient in different cases

0.12d 和人工干预前的 0.26d。同样,根据图 5 分析角度偏差对远场光斑的影响也能发现,当 $W' = 1.0\lambda$ 时,角度偏差应控制在 $0.71\mu\text{rad}$ 以内,这也低于理想拼接时对角度偏差的要求 $0.50\mu\text{rad}$ 和人工干预前的 $0.64\mu\text{rad}$ 。

5 结论

以高能皮秒激光装置中的中实际脉冲压缩光栅尺寸为例,从拼接的拼缝偏差和角度偏差两方面考虑,通过模拟计算,研究像差对衍射光斑性能参量的影响。由前述可知,结合有效的评价判据,得到了在现有条件下拼接过程中实际需要达到的拼接精度。当子光栅综合像差为 1.0λ 时,从能量比例系数 E 改变的角度分析,最大拼缝偏差约为 $0.26d$,最大角度偏差约为 $0.64\mu\text{rad}$,进行人工干预后,最大

拼缝偏差增大为 $0.42d$,最大角度偏差约为 $0.71\mu\text{rad}$,均比无像差时的拼接要求有所降低。这一结论提高了现有实验条件下的拼接的可操作性,对于高能皮秒激光装置中脉冲压缩光栅的研制将具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] JIANG Sh E, DING Y K, MIU W Y, *et al.* Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China [J]. Science China, 2009, 39(11):1571-1583 (in Chinese).
- [2] LIU H, XU L B, PENG Zh T, *et al.* Temporal multiplexing for measurement of temporal profile on SG-III prototype laser facility [J]. Laser Technology, 2010, 34(2):157-160 (in Chinese).
- [3] CHEN X R, GENG K, WU J H. Nondestructive testing method for dielectric reflection grating [J]. Laser Technology, 2005, 29(4):423-425 (in Chinese).
- [3] TETSUO H. Far-field pattern analysis for an arrayed grating compressor [J]. Applied Optics, 2004, A43(4):1362-1365.
- [4] KESSLER T J, BUNKENBURG J, HUANG H. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high energy chirped pulse amplified lasers [J]. Optics Letters, 2004, 29(6):635-637.
- [5] ZENG L J, LI L F. Optical mosaic gratings made by consecutive, phase-interlocked, holographic exposures using diffraction from latent fringes [J]. Optics Letters, 2007, 32(9):1081-1083.
- [6] LI Ch M, WU J H, CHEN X R, *et al.* Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression mosaic grating [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7):1943-1946 (in Chinese).
- [7] WEI J. Method to mosaic diffraction gratings [J]. Journal of Changshu Institute of Technology, 2007, 21(10):51-54 (in Chinese).
- [8] WEI J, WU J H. Theoretical study on wave aberration of mosaic compression gratings [J]. Laser Technology, 2011, 35(3):348-351 (in Chinese).
- [9] WANG Sh H, WU J H, LI Ch M, *et al.* Wavefront aberration analysis of large-aperture grating fabricated by plano-convex lens [J]. Laser Journal, 2007, 28(6):48-50 (in Chinese).
- [10] ZHOU W Ch, PENG Y, XU H L. Way to get integrative aberration of large aperture optical system in the outfield [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4):155-157 (in Chinese).
- [11] SU X Y, LI J T. Information optics [M]. Beijing: Beijing Science Press, 1999:42-45 (in Chinese).
- [12] QIAN G L, WU J H, LI Ch M. Laser pulse pattern influenced by mosaic grating gap [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12):3177-3182 (in Chinese).