

多层电介质衍射光栅高功率激光辐照特性研究

公维超^{1,2}, 郑也^{1,2}, 杨依枫^{1*}, 何兵^{1,3}, 周军^{1,3,4}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038;

⁴南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038

摘要 多层电介质反射式衍射光栅作为光谱合成系统的核心元件, 在高功率激光辐照下的表面形变将导致其衍射特性改变, 进而影响系统合成光束质量和衍射效率。搭建泰曼-格林干涉仪探测在高功率激光辐照下衍射光栅表面的干涉条纹, 经图像处理及泽尼克多项式拟合实现光栅表面形貌的重建。采用高功率光纤激光辐照加热光栅, 测量另一光束经过热畸变光栅后的光束质量和衍射效率演变。结果表明, 在高功率激光辐照下光栅表面形变高度分布为高斯型, 辐照功率密度 3 kW/cm^2 时, 干涉条纹对应区域内的光栅表面在垂直方向上隆起, 最大高度为 127 nm 。表面形变引起衍射光束质量因子 M^2 退化, 这种退化主要来自衍射光远场发散角的增大。光栅衍射效率波动幅度小于 1.8% 。

关键词 测量; 光谱合成; 多层电介质衍射光栅; 干涉测量; 光栅衍射特性

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0504003

Research on Characteristic of Multilayer Dielectric Diffraction Grating under High Power Laser Irradiation

Gong Weichao^{1,2}, Zheng Ye^{1,2}, Yang Yifeng¹, He Bing^{1,3}, Zhou Jun^{1,3,4}

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing Jiangsu 210038, China;

⁴Nanjing Zhong Ke Shen Guang Science & Technology Co., Nanjing Jiangsu 210038, China

Abstract Multilayer dielectric diffraction grating is the most important optical element in spectral beam combining system. The surface distortion of grating under high power laser irradiation will change its diffraction characteristic, which will influence the beam quality and diffraction efficiency of the combining system. We establish an experimental setup of Twyman-Green interferometer to measure the interference fringes on the diffraction grating surface, under the high power laser irradiation. Based on the image processing and Zernike polynomial fitting method, the grating surface profile is reconstructed. With the high power laser heating the grating and another laser measuring the beam quality and diffraction efficiency degradation, the results show that the grating surface deformation distribution conforms to Gaussian model, when the irradiance power density is 3 kW/cm^2 , the

收稿日期: 2016-12-02; 收到修改稿日期: 2017-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(U1330134、61308024)、上海市自然科学基金(16ZR1440100、16ZR1440200)、江苏省科技支撑计划(BE2014001)、江苏省重点研发计划(BE2016005-4)、科技部重点专项(2016YFB0402201)

作者简介: 公维超(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光光谱合成技术方面的研究。

E-mail: gwc_hust@163.com

导师简介: 何兵(1975—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率光纤激光器及合成技术方面的研究。

E-mail: bryanho@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: yfyang@siom.ac.cn

maximum distortion is evaluated to 127 nm, which leads to the diffraction beam quality factor M^2 degradation. The degradation is mainly due to the increase of angle divergence after diffraction. The change of diffraction efficiency is less than 1.8%, which is basically unchanged.

Key words measurement; spectral beam combining; multilayer dielectric diffraction grating; interferometry; grating diffraction characteristic

OCIS codes 120.3180; 140.3298; 050.1950; 050.1940

1 引 言

高功率光纤激光光源具有转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构紧凑等优点,能同时实现高功率和高光束质量激光输出,在工业加工、航空航天、军事工业等领域得到了广泛应用^[1-2]。单纤光纤激光光源的国际最高输出功率记录已达 20 kW^[3]。然而,非线性效应和模式不稳定等不利因素限制了单纤光纤激光光源输出功率的进一步提升^[4-6]。高功率光纤激光合成技术可以使多路激光束叠加,在提高输出功率的同时获得优良的光束质量。目前主流的合成方法为相干合成和非相干光谱合成。相干合成通过电控相位控制或全光反馈自组织锁相的方法调整各路光纤激光器达到相位一致,在远场实现相干,并在功率不变的情况下,大幅提升亮度^[7]。光谱合成是基于色散的逆过程,利用棱镜、衍射光栅或分光镜等色散元件将不同波长和不同入射方向的子光束阵列进行共孔径合成,实现高功率和高质量激光输出。较之其他合成技术,光谱合成有望获得近衍射极限光束,对子光束的相位没有要求,无需复杂的相位控制系统,成为近年来国内外的研究热点^[8-10]。多层电介质(MLD)衍射光栅由电介质材料制作而成,相比金属膜系光栅具有较高的衍射效率和损伤阈值,在高功率光谱合成系统中获得了重要的应用^[11-13]。作为系统的核心元件,光栅承受高功率激光辐照后表面产生的形变会导致其衍射特性改变,最终对合成功能效率和合成光束质量产生重要影响。因此,研究高功率激光辐照对 MLD 衍射光栅特性的影响,以及对光栅设计和光谱合成系统的搭建具有重要的指导意义。

本文采用自主研发的偏振非相关 MLD 反射式衍射光栅,以 1080 nm 连续光纤激光作为光栅辐照光源。搭建了泰曼-格林干涉仪获得光栅表面的干涉条纹图像,通过图像处理技术和泽尼克多项式拟合得到光栅表面的三维轮廓,研究了高功率激光辐照下光栅表面形变。1058 nm 连续近衍射极限光纤激光以近利特罗角入射光栅,测量了衍射光功率和光束质量因子 M^2 ,并总结了高功率激光辐照下光束质量和衍射效率的演变规律。

2 光栅高功率辐照表面形变特性

采用多层电介质衍射光栅为 960 line/mm 偏振非相关反射式光栅,如图 1 所示。光栅基底为 BK9 玻璃,多层介质膜通过电子束气相沉积法涂在基底上,通过光刻胶的全息干涉曝光和显影以及离子束刻蚀等工艺在顶端刻蚀出光栅脊。 θ_g 为底层膜的角度, f 为底层膜的占空比, D 为光栅周期。阴影区域 H 代表 SiO_2 膜层,空白区域 L 代表 Ta_2O_5 膜层。光栅脊上层阴影区 t_{g1} 为 HFO_2 ,下层空白区 t_{g2} 为 SiO_2 。实验采用的

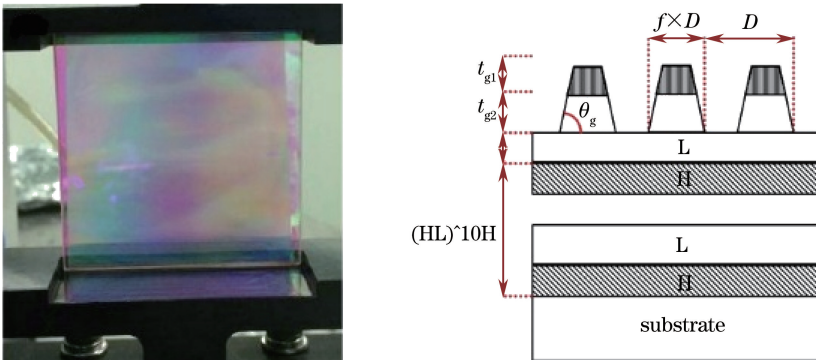


图 1 多层电介质衍射光栅结构

Fig. 1 Schematic of multilayer dielectric diffraction grating

光栅参数为 $\theta_g = 80^\circ, f = 0.73, D = 1041.67 \text{ nm}$ 。

基于泰曼-格林干涉仪结构搭建多层电介质衍射光栅表面形变测量系统,如图 2 所示。泰曼-格林干涉仪是迈克耳孙干涉仪的变种,是典型的双光路平板干涉仪,通过干涉条纹来反映被测光学元件与系统误差信息。He-Ne 激光作为泰曼-格林干涉仪光源,经准直镜组和空间滤波器实现准直与滤波,由半透半反镜(分光比为 1:1)分为两束相干光,一束经参考平面镜反射,另一束经 MLD 光栅反射,两束光会合在 CCD 表面形成干涉条纹。1080 nm 高功率光纤激光相比利特罗角偏转一定的角度辐照光栅,功率为 881 W,光束直径为 6 mm,光栅表面功率密度达到 3 kW/cm^2 。He-Ne 激光扩束后直径约为 3 mm,光束垂直入射光栅,落在光纤激光照射光栅的区域内。参考镜偏转一定的角度,将会产生等厚干涉条纹。测量系统获得光栅表面在无光纤激光辐照和高功率光纤激光辐照下的两组干涉条纹。

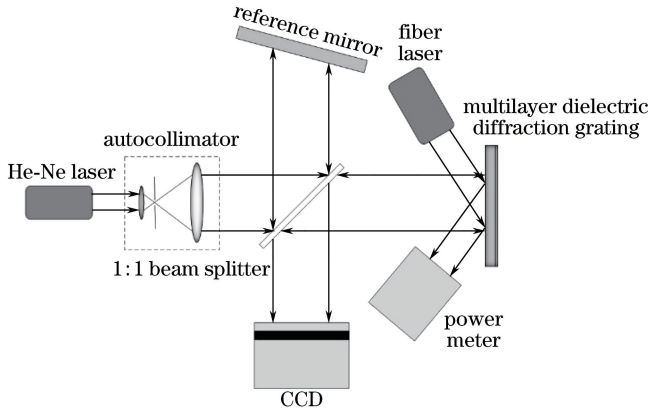


图 2 泰曼-格林干涉仪多层电介质光栅表面形变测量系统

Fig. 2 Twyman-Green interferometer system for measuring surface distortion of MLD grating

原始干涉条纹图像需要采用图像处理技术获得精确数据以进行分析和计算。图像的处理流程包括去噪声、二值化和条纹的细化。实验采用巴特沃斯低通滤波器来滤除高频噪声,大津法最佳阈值法来二值化图像,以及数学形态学运算来完成条纹的细化。图 2 为无辐照和辐照激光功率密度为 3 kW/cm^2 状况下,CCD 采集到的干涉条纹和处理后的条纹图像。

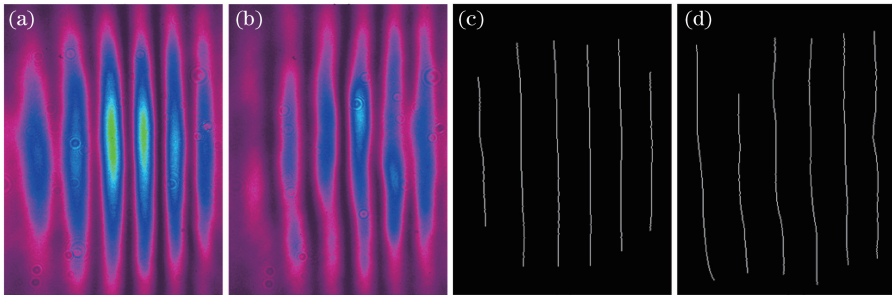


图 3 不同辐照功率密度的干涉条纹。(a)无辐照;(b)辐照功率密度 3 kW/cm^2 ;(c)无辐照经图像处理;
(d)辐照功率密度 3 kW/cm^2 经图像处理

Fig. 3 Interference fringes under different irradiation power densities. (a) No irradiation; (b) irradiation power density of 3 kW/cm^2 ; (c) no irradiation with image process; (d) irradiation power density of 3 kW/cm^2 with image process

根据干涉原理,细化后的条纹是干涉极大值的点,代表了光栅和参考平面镜间的相对距离,即光栅表面的高度。每条条纹高度相等,相邻条纹高度差为 $\lambda/2, \lambda = 633 \text{ nm}$ 是 He-Ne 激光的波长。基于上述图像处理后的干涉条纹,采用泽尼克多项式拟合采样区域内光栅表面高度的函数。泽尼克多项式在单位圆上正交,具有旋转对称性且与初级像差具有一定的对应关系,因此适合于光学干涉波面的拟合。光栅表面高度函数 $w(x, y)$ 用 n 项泽尼克多项式表示为

$$w(x, y) = q_1 Z_1(x, y) + q_2 Z_2(x, y) + \dots + q_n Z_n(x, y), \quad (1)$$

式中 Z_n 是第 n 项泽尼克多项式,具体表达式见文献[14], q_n 是第 n 项多项式的系数。为了保证拟合的精度,

多项式的阶数要小于干涉条纹的数目^[15],选取前 8 项泽尼克多项式,最高阶数为 4。根据图 2(c)和(d)条纹采样点高度拟合出采样区域内无辐照和高功率激光辐照下光栅表面高度的连续函数,两者相减得到光栅表面形变,如图 4 所示。

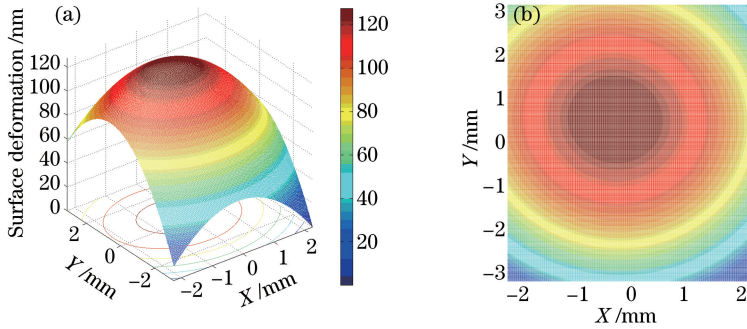


图 4 光栅表面形变拟合结果。(a)三维高度图;(b) x - y 平面图

Fig. 4 Fitting results of surface distortion of grating. (a) Three-dimensional plot; (b) x - y plane plot

图 4(a)表明,当光栅承受的功率密度为 3 kW/cm^2 时,干涉条纹对应区域内的光栅表面在垂直方向上隆起,最大高度为 127 nm ,约 0.2λ 。图 4(b)得到光栅表面形变高度为高斯分布,与高功率光纤激光高斯光束的光强分布特性一致。结论是,光栅表面形变高度分布与辐照高功率激光光束的强度分布一致。由于 He-Ne 激光光束口径小于辐照光源光束,不能探测到更大辐照区域的表面形变。因此,通过对 He-Ne 激光进一步扩束或者采用光束指向系统遍历光栅上受辐照点进行孔径拼接,可以实现更大范围的光栅表面形变探测。

3 光栅高功率辐照衍射特性

多层电介质衍射光栅在高功率激光辐照下,由于热吸收的存在会使光栅温度升高引起基底和反射膜层形变,从而导致光栅表面产生形变。根据文献[16]构造的 MLD 光栅热形变理论模型,光栅形变造成表面法向和光栅周期的变化,两者对光束的近场相位调制作用影响了远场光斑的能量分布以及光束束腰直径和远场发散角,导致衍射光束质量退化。搭建了光栅高功率激光辐照衍射特性监测装置研究光栅表面形变对衍射光光束质量和衍射效率的影响,如图 5 所示。

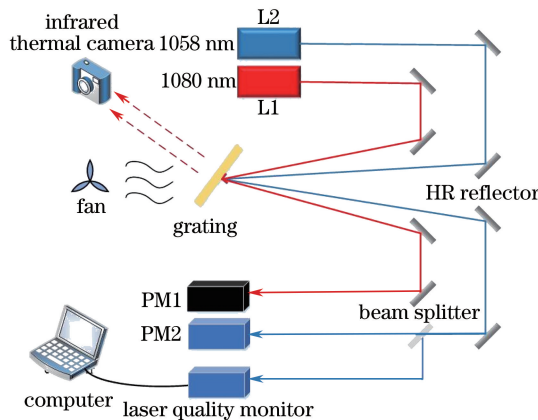


图 5 光栅高功率辐照衍射特性监测装置

Fig. 5 Experimental setup of grating diffraction characteristic under high power irradiation

1080 nm 高功率辐照光源 L1 与 1058 nm 测量光源 L2 通过反射镜组以不同角度入射至光栅表面相同位置。L2 相对光栅以近利特罗角度入射,L1 以图 2 辐照光源相同角度入射。L2 经光栅衍射后通过反射镜进入光束质量分析仪。连续调节辐照光源的输出功率,使光栅承受不同的功率密度,由红外热像仪观测光栅表面温度变化。在不同功率密度下,光栅温度达到稳定数值时进行测量,且保证温度在测量过程中不出现较大起伏。光束质量分析仪测量 L2 衍射光光束质量因子 M^2 ,研究束腰直径和远场发散角随光栅辐照功率的

演变规律。

实验中辐照光源最大功率为 536 W, 光束直径为 4 mm, 光栅辐照最高功率密度为 3.6 kW/cm²。测量光源功率为 200 mW, 光束直径为 12 mm, 长期工作功率起伏小于 1%, 光束质量因子 $M^2 = 1.2$ 且不随时间变化。

高功率激光辐照状况下光栅表面温度, 衍射光光束质量因子 M^2 , 束腰直径 ω 和远场发散角 θ 随功率密度的演变如图 6 所示。其中图 6(a) 为光栅表面温度和 M^2 的演化情况。当辐照功率密度增长时, 光栅温度从 25 °C 升至 192 °C, 衍射光的 M^2 由 2.35 升至 2.56, 相对变化量为 9%, 光栅温度升高引起衍射光光束质量退化, 两者呈正相关。图 6(b) 为衍射光束束腰直径与远场发散角随辐照功率密度的演变情况。当辐照功率密度增长时, 衍射光束束腰直径呈下降趋势, 变化范围为 0.11 mm, 相对变化量为 8%; 远场发散角呈增大趋势, 0~3.6 kW/cm² 范围内变化 0.4 mrad, 相对变化量为 16%。考虑到光束质量因子 M^2 由束腰直径和远场发散角乘积决定, 衍射光 M^2 增大的主要原因为衍射光远场发散角随光栅辐照功率密度增加而变大。光栅受高功率激光辐照后出现的表面形变对入射光的近场相位调制作用会使衍射光远场发散角变大, 同时使衍射光束束腰直径变小, 但束腰直径的变化量小于远场发散角, 最终导致光束质量退化。

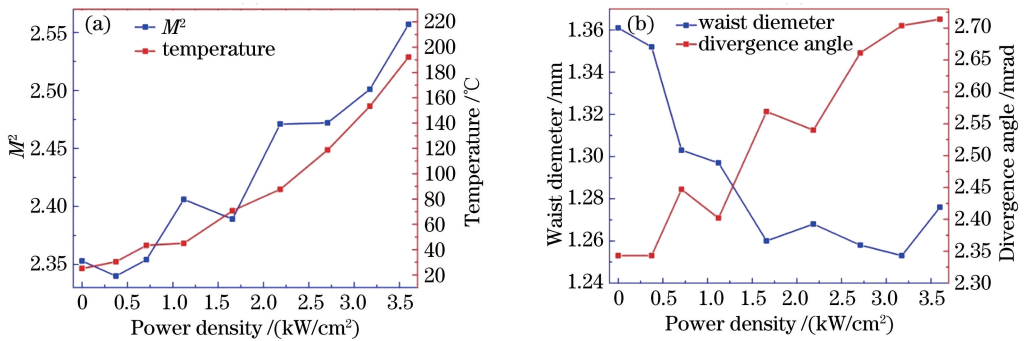


图 6 (a) 光栅表面温度与光束质量随辐照功率密度的演变; (b) 束腰直径与远场发散角随辐照功率密度的演变
Fig. 6 (a) Temperature on grating surface and beam quality versus the irradiation power density;
(b) waist diameter and far field divergence angle versus the irradiation power density

辐照光源光束直径为 4 mm, 因此随着辐照光源功率从 0 提升至 536 W, 光栅表面激光辐照功率密度从 0 W/cm² 提升至 3.6 kW/cm²。光栅衍射效率随辐照功率密度的变化如图 7 所示, 随着辐照功率密度的升高, 衍射效率呈下降趋势, 从 93.3% 下降到 91.5%, 波动幅度小于 1.8%。

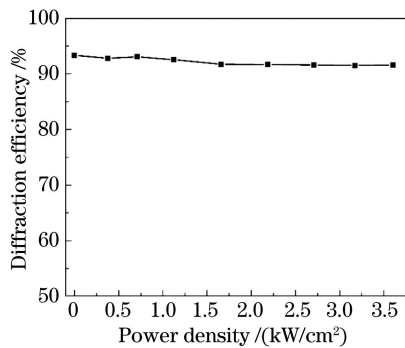


图 7 光栅衍射效率随辐照光功率密度的演化
Fig. 7 Diffraction efficiency of the grating versus the irradiation power density

4 结 论

采用高功率光纤激光辐照自主设计研发的多层电介质衍射光栅, 测量光栅表面形变及其对衍射光光束质量的影响。实验发现, 当光栅表面激光辐照功率密度达到 3 kW/cm² 时, 光栅表面产生的形变高度为高斯分布, 与辐照光强分布相同, 测量区域内最大形变量为 127 nm。辐照功率密度由 0 增加到 3.6 kW/cm² 时, 光栅温度从 25 °C 升高至 192 °C, 衍射光束束腰直径呈下降趋势, 远场发散角呈上升趋势, 发散角的升高超过了

束腰直径的下降,衍射光光束质量因子 M^2 发生退化,相对退化量为 9%。同时,光栅衍射效率基本保持不变,波动幅度小于 1.8%。结果表明,高功率激光辐照使多层电介质衍射光栅表面出现形变,引起光栅衍射光光束质量退化,这种退化主要来自衍射光远场发散角的扩大。对于多层电介质衍射光栅高功率辐照状况下的特性研究为搭建基于多层电介质衍射光栅的光纤激光光谱合成系统提供了一定指导,主动冷却光栅或者使用导热基底制作的光栅抑制光栅表面形变能使系统向更高功率扩展。

参 考 文 献

- [1] Limpert J, Liem A, Zellmer H, *et al.* 500 W continuous-wave fiber laser with excellent beam quality[J]. Electronics Letters, 2003, 39(8): 645-647.
- [2] Jeong Y, Sahu J, Payne D, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [3] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market [C]. CLEO: 2013 Technical Digest, OSA, 2013, AF2J. 1.
- [4] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, *et al.* Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [5] Taverner D, Richardson D J, Dong L, *et al.* 158 μ J pulses from a single transverse mode, large mode-area EDFA[J]. Optics Letters, 1997, 22: 378-380.
- [6] Savageleuchs M, Afzal R, Honea E. Threshold power and fiber degradation induced modal instabilities in high-power fiber amplifiers based on large mode area fibers [J]. Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 2014, 8961: 89611R.
- [7] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- [8] Augst S J, Goyal A K, Aggarwal R L, *et al.* Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers [J]. Optics Letters, 2003, 28(5): 331-3.
- [9] Sevian A, Andrusyak O, Ciapurin I, *et al.* Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining [J]. Optics Letters, 2008, 33(4): 384-6.
- [10] Volodin B L, Dolgy S V, Melnik E D, *et al.* Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings [J]. Optics Letters, 2004, 29(16): 1891-3.
- [11] Perry M D, Shannon C, Shults E, *et al.* High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings [J]. Optics Letters, 1995, 20(8): 940-2.
- [12] Hehl K, Bischoff J, Mohaupt U, *et al.* High-efficiency dielectric reflection gratings: design, fabrication, and analysis [J]. Applied Optics, 1999, 38(30): 6257-71.
- [13] Britten J A, Perry M D, Shore B W, *et al.* High-efficiency dielectric multilayer gratings optimized for manufacturability and laser damage threshold [J]. Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 1996: 511-520.
- [14] Shan Baozhong, Wang Shuyan, Niu Hanben, *et al.* Zernike polynomial fitting method and its application [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3): 318-323.
单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨, 等. Zernike 多项式拟合方法及应用 [J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 318-323.
- [15] Mo Weidong, The principle of fitting interferogram with Zernike polynomials [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2002, 3(3): 35-38.
莫卫东. Zernike 多项式拟合干涉波面的基本原则 [J]. 空军工程大学学报·自然科学版, 2002, 3(3): 35-38.
- [16] Yang L, Wu Z, Zhang B. Influence of thermal deformation of a multilayer dielectric grating on a spectrally combined beam [J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 9091-9100.