

用于激光数字投影显示系统的匀光整形元件设计

张 巍¹ 梁传样^{1,2} 李 金¹ 芮大为¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100039

摘要 激光光源在数字投影显示系统中的使用日趋广泛并成为未来发展的方向之一。衍射光学元件(DOE)用于激光数字投影系统,可利用其整形能力强、匀光性能好、体积小等特点实现空间光调制器件的高效率均匀照明,并有利于投影系统照明光路简化,提高系统集成度。基于傅里叶变换的分步迭代方法进行了该类DOE元件的优化设计。DOE采用16台阶位相结构,设计结果实现了激光整形、匀光功能,其照明能量利用率达到85%以上,照度均匀性优于90%,与目标光强分布的均方根偏差小于7%。

关键词 光学器件; 衍射光学元件; 光束整形; 均匀照明; 激光投影显示

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0805001

Design of Optical Elements for Beam Shaping and Uniform Illumination in Laser Digital Projection Display System

Zhang Wei¹ Liang Chuanyang^{1,2} Li Jin¹ Rui Dawei¹

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China

Abstract Laser light source is widely used in digital projection display system in recent years, and the laser display is representing one of the future development trend of display technology. In laser digital projection display system, diffractive optical element (DOE) can realize uniform illumination on light modulator utilizing its good beam shaping ability and small size. The advantages of adopting DOE are not only higher efficiency of light source, better uniformity of illumination but also making the display system more compact. DOE that has 16 phase level is designed by using the Fourier transform step-iterative algorithm and the function of beam shaping and uniform illumination is realized. The simulation results show that the energy efficiency of light source is better than 85%, the uniformity of illumination is higher than 90%, and the Root-Mean-Square of difference of intensity profile compared with the ideal one is less than 7%.

Key words optical devices; diffractive optical element; beam shaping; uniform illumination; laser projection display

OCIS codes 050.1970; 140.3300; 120.2040

1 引 言

近年来随着数字投影技术的不断进步,以数字电影放映机、工程投影机及用于办公、娱乐的投影仪为代表的数字投影放映系统得到了广泛的应用。作为投影系统的核心组件之一,光源的作用至关重要,其发展亦不断促进投影技术的变革。目前,投影系统使用的光源有氙灯、金属卤素灯、高压汞灯以及新兴的发光二极管(LED)和激光光源等^[1],根据投影系统应用场景的不同,各种光源具有各自不同的应用。相比于其他光源,激光光源具有大色域、高亮度、高能效、长寿命等优点。近年来,随着半导体激光技术的不断进步,限制激光用于投影系统光源的体积大、成本高、散斑效应明显等问题得到了有效改善,按照目前技术发展趋势,

收稿日期: 2015-02-12; 收到修改稿日期: 2015-03-31

基金项目: 国家863计划(2014AA032900)

作者简介: 张 巍(1978—),男,博士,副研究员,主要从事衍射光学、短波段光学技术方面的研究。E-mail: zhangw@sklao.ac.cn

激光器作为投影系统主要光源之一日渐成熟,特别是在数字电影放映机、高亮度投影仪等特殊应用领域,激光光源的使用受到业界的普遍关注,已成为未来技术发展的重要方向之一^[2-3]。

通常激光器输出的光束能量集中,其光强分布、尺寸、形状均不能直接满足数字投影系统光调制器件,如液晶显示器件(LCD)、数字微镜器件(DMD)、硅基液晶器件(LCoS)^[4-5]的均匀照明需求。因此,在激光投影显示系统中,光源输出的光束一般需要通过匀光、整形单元,在保证高能量利用率的基础上,实现对激光光束的整形与匀光,再通过中继照明单元实现对光调制器的均匀照明。衍射光学元件(DOE)是激光光束匀光、整形的常用器件,相比于一般投影显示光学系统中采用的积分棒、透镜阵列^[6-8]等,具有更强的光强分布控制能力,更好地满足照明均匀性及尺寸的需求,提升光源能量利用率。同时采用 DOE 的匀光、整形光路结构简单,器件可以实现小型化,有利于提高激光投影系统集成度。本文利用分步迭代方法^[9],开展了用于激光数字投影显示系统的整形、匀光 DOE 设计,并对光源能量利用率、照明均匀性、整形能力进行了评估,为激光投影系统光学引擎设计与优化提供参考。

2 设计模型与方法

2.1 用于匀光、整形的 DOE 设计模型

本文重点是验证衍射光学元件用于激光投影显示系统的可行性,评估该类元件光束整形、匀光效果,因此对 DOE 设计模型进行了如图 1 所示的合理简化。激光器发出的激光束垂直入射于 DOE 表面, DOE 可简化为纯位相元件,其产生的位相分布由 $\varphi_{\text{DOE}}(x_i, y_i)$ 描述。入射光束复振幅 $U_i(x_i, y_i)$, 对应位相分布为 $\varphi_{\text{laser}}(x_i, y_i)$, 经 DOE 后自由传输至相距为 L 的目标平面,其复振幅为 $U_o(x_o, y_o)$, 对应的光强为 $I_o(x_o, y_o)$ 。

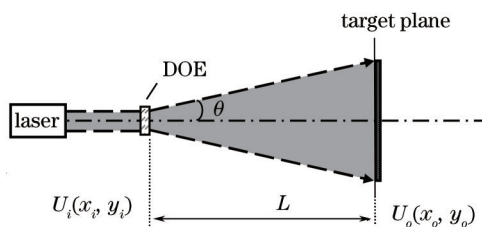


图 1 基于 DOE 的光调制器均匀照明光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of DOE optical setup for uniform illumination on light modulator

对于上述传输过程,在满足傍轴近似条件下,通过标量衍射理论, $U_i(x_i, y_i)$ 、 $\varphi_{\text{DOE}}(x_i, y_i)$ 与 $U_o(x_o, y_o)$ 间可建立关系

$$U_o(x_o, y_o) = \frac{1}{\lambda L} \iint \left\{ \sqrt{I_i(x_i, y_i)} \cdot \exp[i\varphi_{\text{laser}}(x_i, y_i)] \right\} \cdot \exp[i\varphi_{\text{DOE}}(x_i, y_i)] \cdot \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda L}(x_i^2 + y_i^2)\right] \cdot \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda L}(x_i x_o + y_i y_o)\right] dx_i dy_i \quad (1)$$

由于设计主要关心目标平面的光强分布,因此(1)式中忽略了部分常位相因子。按照设计要求, $I_o(x_o, y_o)$ 应满足空间光调制器的照明尺寸与均匀性目标。

$$I_o(x_o, y_o) = A \left| F \left\{ \sqrt{I_i(x_i, y_i)} \cdot \exp[i\varphi_i(x_i, y_i)] \right\} \right|^2, \quad (2)$$

$$\varphi_i(x_i, y_i) = \varphi_{\text{laser}}(x_i, y_i) + \varphi_{\text{DOE}}(x_i, y_i) + \frac{\pi}{\lambda L}(x_i^2 + y_i^2), \quad (3)$$

式中 $F\{*\}$ 代表傅里叶变换, A 为可通过 Parseval 定理求出的常数。

该设计模型中, DOE 通过对 $U_i(x_i, y_i)$ 的位相调制,在目标平面实现了对激光光束的整形、匀光功能。 DOE 的设计转化为,在已知入射光复振幅 $U_i(x_i, y_i)$ 和目标面光强分布 $I_o(x_o, y_o)$ 的条件下,基于标量衍射理论,逆向求解 $\varphi_{\text{DOE}}(x_i, y_i)$ 的问题。

实际激光投影显示系统由于应用需求的差异,激光光源参数、空间光调制器类型、尺寸与配置等不尽相同,所采用的光路结构亦有较大差异。但 DOE 的设计模型均可通过相应转化,简化为上述设计模型,其差异在于对不同入射光尺寸及不同光调制器光学扩展量,需要合理设置 DOE 位相单元线宽 d 及工作距离 L ,在保证元件整形与匀光能力的同时,满足照明光学扩展量的要求,实现光调制器件的均匀照明。投影显示光学系统为光学扩展量受限系统^[10],一般系统的光学扩展量受空间光调制器限制。因此, DOE 设计时可根据空间光调制器光学扩展量对 θ 进行约束,从而根据目标面照明尺寸确定工作距离 L ,并可由 $d \cdot \sin \theta = \lambda$ 来近似计

算获得单元线宽 d 的上限值,其中 λ 为入射光束的波长。实际光学系统中,可在激光器与 DOE 之间、DOE 与目标平面之间放置反射器件进行光路折转,以适应不同的投影系统光学引擎设计。对于反射式空间光调制器件,可在目标平面后配置中继镜组实现器件的照明。

2.2 分步迭代设计方法

针对上述 DOE 设计所涉及的位相恢复问题,已发展出基于迭代、优化搜索及两者混合的多种理论方法。其中基于傅里叶变换的迭代方法由于收敛速度快、算法结构简单等优点而被广泛采用。常用 DOE 设计方法包括 G-S 算法^[11]、输入-输出算法^[12]、自适应加法算法^[13]、位相混合算法^[14]以及本文设计所采用的分步迭代算法等。分布迭代算法的迭代过程为

$$\begin{cases} U_o^{(k)} = \left(\sqrt{I_o} + \alpha_k \cdot \left| \sqrt{I_o} - |U_o^{(k)}| \right| \right) \exp \left[i \arg \left(U_o^{(k)} \right) \right] \\ U_i^{\prime(k+1)} = F^{-1} \left\{ U_o^{(k)} \right\} \\ U_i^{(k+1)} = \left| \sqrt{I_i} \right| \exp \left\{ i \left[\beta_k \cdot \arg \left(U_i^{\prime(k+1)} \right) + (1 - \beta_k) \arg \left(U_i^{(k)} \right) \right] \right\} \\ U_o^{\prime(k+1)} = F \left\{ U_i^{(k+1)} \right\} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $\arg(*)$ 代表取复振幅的位相。

该算法的特点是在位相混合算法的基础上,引入在一定范围内具有随机分布的振幅反馈因子 α_k 与位相反馈因子 β_k 代替固定反馈因子。在每一步迭代中对 α 和 β 的任一随机值计算得出的 $U_o^{(k+1)}$ 进行比较,如果比 $U_o^{(k)}$ 更接近理想值则进入下一步优化,如果相反则重新选取一组 α 和 β 直至与匀光、整形目标相关的费用函数下降。该方法通过提高变换系统配置参数自由度,进一步提升迭代的收敛速度与优化效果,相关算法说明及有效性可参见文献[9]。

3 DOE 结构参数及设计结果

以基于 1920 pixel×1080 pixel,偏转角 $\pm 12^\circ$ 的 DMD 芯片的数字激光投影系统为例,进行用于激光投影系统匀光整形的 DOE 的设计。DMD 照明尺寸 14.52 mm×8.16 mm,照明数值孔径 $NA \leq 0.2$ 。设入射光束为波长 638 nm 红光,光束直径 1 mm,位相为常数位相分布,光强为高斯分布,如图 2(a)所示。根据上述条件可设置目标平面与 DOE 所在平面的距离 L 为 50 mm。目标平面的理想光场分布如图 2(b)所示,为 14.52 mm×8.16 mm 矩形均匀光斑。按照图 1 模型,计算可得 θ 约为 9.5° ,目标平面与 DMD 之间配置倍率为 1 的中继镜组,则可满足 DMD 照明数值孔径要求。

针对上述设计目标与约束,设定 DOE 通光口径为 1 mm,单元数为 $N=1024 \times 1024$,DOE 采用 16 台阶级结构。对于设计结果,采用照明效率 η (目标平面内照明区域能量占总能量的比)和所得光强分布与目标平面理想光强分布 I_o 在各采样点的均方根偏差 $\chi = \sqrt{\sum_n (I_{\text{design}} - I_o)^2 / (n - 1)}$ 来对 DOE 能量利用率和光束整形、匀光性能进行评价,其中 I_{design} 为设计所得目标平面上的光强分布, n 为均匀照明矩形区域内采样点数。

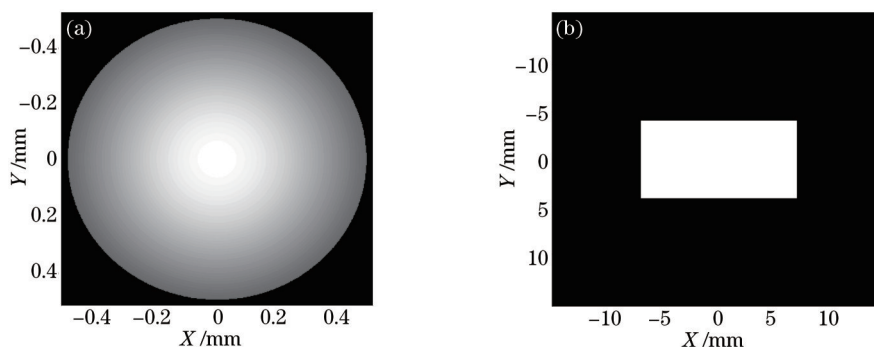


图 2 (a) DOE 入射光强分布;(b) 目标平面理想出射光强分布

Fig.2 (a) Intensity distribution of input beam on DOE; (b) ideal intensity distribution of output beam on target plane

根据上述参数采用分步迭代方法进行DOE设计。元件初始位相采用随机分布产生,经200次迭代后,所得结果如图3所示。其中图3(a)为设计所得DOE位相的二维分布,图3(b)为图3(a)沿X轴方向过中心的一维局部放大图,可明显看到16台阶的位相结构,图3(c)为设计所得目标平面的光强分布图,通过数值计算,其照明效率 $\eta=85.6\%$, $\chi=6.6\%$,图3(d)为图3(c)沿X轴方向过中心的一维光强归一化分布图。由图3的设计结果可见,所得DOE在目标平面实现了对激光束的匀光、整形功能,在照明效率优于85%的同时,照明形状、尺寸和图形陡边性都得到了严格的控制。图3(d)中均匀照明区域内的个别较为突出的“毛刺”主要是由于DOE设计过程中对位相进行16台阶规划时导致的偏差,可进一步通过搜索优化方法^[15]予以去除。

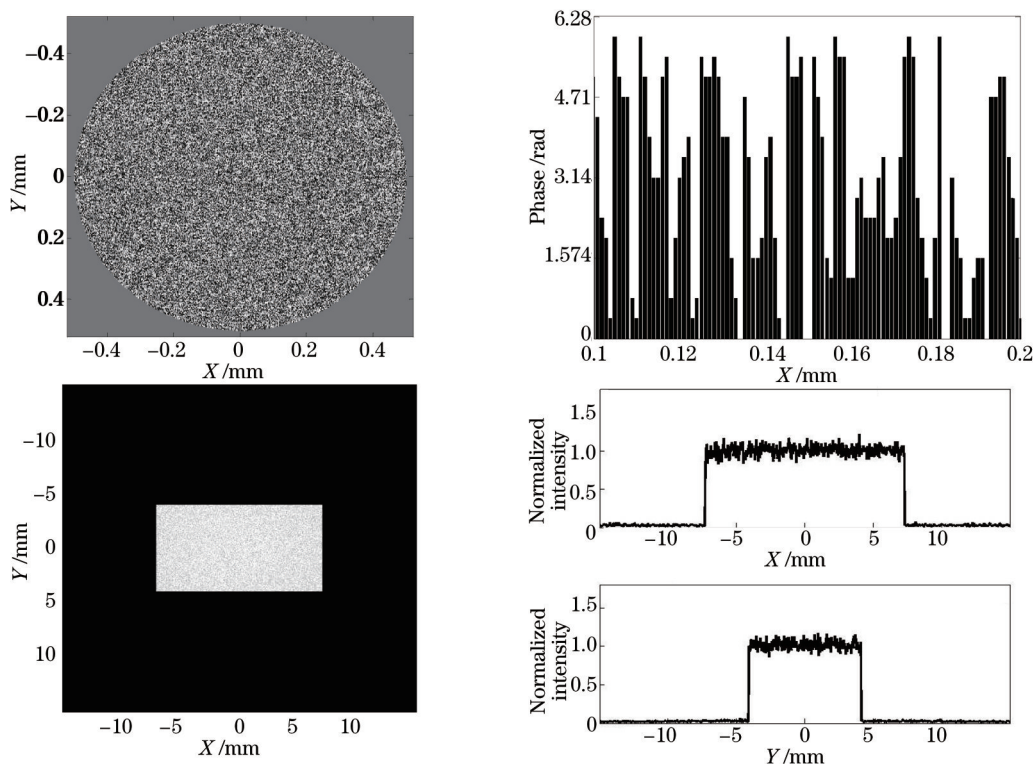


图3 均匀照明 DOE 设计结果。(a)DOE 位相分布;(b)图(a)一维方向局部位相分布;
(c)目标平面光强分布;(d)图(c)过中心 X、Y 方向一维光强分布

Fig.3 Design results of DOE for uniform illumination. (a) Phase distribution of DOE; (b) one dimension local phase frame of (a);
(c) output beam on target plane; (d) one dimension intensity distributions of (c) along X and Y directions

进一步,参考电子行业标准《SJ/T 11346-2006 电子投影机测量方法》中有关照度均匀性的测试方法,在图3(c)中矩形均匀照明区域,按图4所示的13个位置点进行采样,对目标面照明均匀性进行评估。其中,点1至9为将照明区域平均划分为九个区域的中心点,点10至13为四角点至中心点5距离10%的位置。

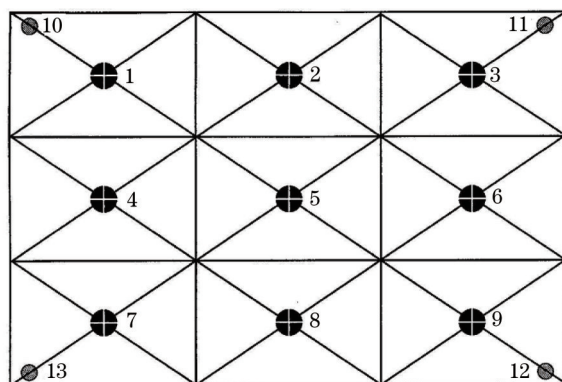


图4 用于均匀性评估的采样点位置分布

Fig.4 Positions of sampling light intensity for evaluating uniformity of illumination

设定 1 至 9 采样点处光强平均值为 I_a , 1 至 13 采样点处光强最大值、最小值分别为 I_{\max} 和 I_{\min} , 则计算

$$[1 - (I_{\max} - I_a)/I_a] \times 100\%, \quad (5)$$

$$[1 - (I_a - I_{\min})/I_a] \times 100\%, \quad (6)$$

取其中较小值描述照明均匀性。按照该评价方法, 图 3(c)中 14.52 mm×8.16 mm 矩形照明区域均匀性为 90.7%。

4 结 论

结合激光投影显示系统的需求, 系统地论述了衍射光学元件用于光调制器均匀照明的设计方案, 并给出了相关元件的设计实例。所得 16 台阶 DOE 设计结果实现了对激光光束整形、匀光的功能, 其照明能量利用率达到 85% 以上, 照度均匀性优于 90%, 与目标光强分布的均方根偏差小于 7%, 并且照度均匀性根据实际系统的需求还有进一步提升的可能。采用本方法设计的 DOE 器件尺寸小巧, 应用光路结构简单, 有利于提高激光投影系统集成度。所设计的 16 台阶 DOE 其子单元横向尺寸约为 1 μm , 纵向最小刻蚀深度约为 40 nm。参考文献[16]所述 DOE 加工方法, 上述元件可以通过电子束曝光及离子束刻蚀^[17]的方法实现。实际激光投影系统一般采用红、绿、蓝三色激光束为光源, 以红基色激光为例进行了 DOE 设计, 蓝光、绿光的匀光、整形 DOE 可采用相同设计方法得到, 性能与本文示例基本一致。

综上, 通过设计实例证明了 DOE 用于激光数字投影显示系统照明光束匀光、整形的可行性, 所述衍射光学元件设计方法及结果能够为激光投影系统光学引擎的设计与优化提供参考。

参 考 文 献

- 1 Zhao Jianyong. Projection Display Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014: 30-42.
赵坚勇. 投影显示技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 30-42.
- 2 G Hollemann, B Braun, P Heist, *et al.*. High-power laser projection displays[J]. Proc SPIE, 2001, 4294: 36-46.
- 3 Y Zhang, H Dong, R Wang, *et al.*. Demonstration of a home projector based on RGB semiconductor lasers[J]. Appl Opt, 2012, 51(1): 3584-3589.
- 4 L J Hornbeck. Digital light processing for high-brightness, high-resolution applications[J]. Proc SPIE, 1997, 3013: 27-40.
- 5 William P Bleha, Lijuan Alice Lei. Advances in liquid crystal on silicon (LCOS) spatial light modulator technology[J]. Proc SPIE, 2013, 8736: 87360A.
- 6 Zhao Xing, Fang Zhiliang, Cui Jicheng, *et al.*. Study on the optical engine of the mini-projector[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 913-918.
赵 星, 方志良, 崔继承, 等. 微型投影机光学引擎的研究[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 913-918.
- 7 Liu Hong, Wang Weisheng, Zheng Jian. Optical design of laser projection display system by light pipe[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(7): 079003A.
刘 红, 王蔚生, 郑 健. 激光投影显示中光棒匀光的照明光路设计[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7): 079003A.
- 8 Li Dan, Xue Yunyun, Cao Wen, *et al.*. Optimization of DMD illumination system with microlens array[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122002.
李 丹, 薛芸芸, 曹 雯, 等. 基于微透镜阵列的 DMD 芯片投影系统照明优化[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122002.
- 9 Zhang Wei, Zhang Xiaobo, Shu Fangjie, *et al.*. Design of diffractive optical elements by step iterative algorithm[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(11): 1665-1668.
张 巍, 张晓波, 舒方杰, 等. 采用分步迭代法设计制作衍射光学元件[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11): 1665-1668.
- 10 Zhang Zengbao. Investigation on Optical Engine Applied to Projection Display System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 20-22.
张增宝. 投影显示系统光学引擎研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004: 20-22.
- 11 R W Gerchberg, W O Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. Optik, 1972, 35(2): 237-246.
- 12 Fienup J R. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms[J]. Optical Engineering, 1980, 19(3): 297-305.
- 13 Wen Changli, Ji Jiarong, Dou Wenhua, *et al.*. The ameliorated adaptive-additive method and its applying in the designing of

- diffractive optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2473-2477.
- 温昌礼, 季家谔, 窦文华, 等. 改进的自适应加法算法及其在衍射光学元件设计中的应用[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2473-2477.
- 14 X G Deng, Y P Li, Y Qiu, *et al.*. Phase-mixture algorithm applied to design of pure phase elements[J]. *Chinese J Lasers*, 1995, 4(5): 447-454.
- 15 Zhang Wei, Shu Fangjie, Zhang Xiaobo, *et al.*. Spatial frequency spectrum optimization method for design of diffractive optical elements in uniform illumination [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(10): 1388-1392.
- 张 巍, 舒方杰, 张晓波, 等. 均匀照明用衍射光学器件的空间频域优化设计方法[J]. *中国激光*, 2007, 34(10): 1388-1392.
- 16 Ren Yantong, Fu Yongqi, Fabrication technology & future development for diffractive optical elements[J]. *Opt Precision Eng*, 1997, 5(2): 7-11.
- 任延同, 付永启. 衍射光学元件制作技术及未来展望[J]. *光学 精密工程*, 1997, 5(2): 7-11.
- 17 Ren Yantong. Presence and future developing tendency of ion-etching technology[J]. *Opt Precision Eng*, 1998, 6 (2): 7-14.
- 任延同. 离子刻蚀技术现状与未来发展[J]. *光学 精密工程*, 1998, 6(2): 7-14.

栏目编辑: 刘丰瑞