

文章编号: 0258-7025(2009)01-0110-05

# KBA 显微成像系统程序设计与模拟

赵玲玲<sup>1</sup> 胡家升<sup>2</sup> 孙德林<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 鲁东大学物理与电子工程学院, 山东 烟台 264025  
<sup>2</sup> 大连理工大学电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024  
<sup>3</sup> 鲁东大学交通学院, 山东 烟台 264025

**摘要** 近 20 年来,由于 X 射线光刻技术、空间技术以及激光引爆的惯性约束聚变(ICF)的过程诊断等的需求,X 射线成像技术获得迅速发展。但是,由于常规的成像方法难以适应 X 射线波段,目前大多采用掠入射反射成像和编码孔径成像方法。KBA 显微镜为掠入射非共轴 X 射线反射成像系统,而且四块反射镜是空间分布的,前两块反射镜和后两块反射镜之间并不是严格互相垂直的,这给像质分析带来相当大的困难。通常的光学 CAD 软件难于适应这种光学系统。因此设计了掠入射非共轴反射成像的 KBA 显微镜成像系统程序,并用该程序分析了该系统的综合误差。物距公差为  $-0.4 \sim +1$  mm,掠入射角公差在  $-8'' \sim 0$ ,双反射镜公差在  $-20'' \sim 0$ ,弥散斑的变化在允许的范围。

**关键词** X 射线光学;X 射线成像;KBA 显微镜;掠入射反射成像;消像散系统

中图分类号 O434.19 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093601.0110

## Programming Design and Simulation of KBA Microscope Imaging System

Zhao Lingling<sup>1</sup> Hu Jiasheng<sup>2</sup> Sun Delin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Electronic Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China

<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

<sup>3</sup> School of Communication, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China

**Abstract** In the latest 20 years, X-ray imaging technology has developed fast in order to meet the need of X-ray photo-etching, space exploration technology, high-energy physics, procedure diagnosis of inertial confinement fusion (ICF) etc. However, conventional imaging methods are hardly suitable to X-ray range, grazing reflective imaging and coding aperture imaging methods have been adopted more and more. KBA X-ray microscope is grazing non-coaxial incident X-ray microscope, and four mirrors distribute spatially. The front pair is not perpendicular to the back pair strictly, but tilts a small angle along the ray, and it brings very large difficulty to analysis of image quality. Thus general optical CAD program is not suitable to this kind of optical system. In this paper, programming for non-coaxial grazing incident microscope is discussed in detail, and it is used to analyze the synthesis errors. When the tolerance of object distance is between  $-0.4 \sim +1$  mm, the tolerance of grazing incident angle is between  $-8'' \sim 0$ , and the tolerance of angle between the bimirror is within  $-20'' \sim 0$ , the blur is permitted.

**Key words** X-ray optics; X-ray imaging; KBA microscope; grazing reflective imaging; anastigmatic system

## 1 引言

X 射线波段多采用掠入射反射成像和编码孔径成像技术<sup>[1,2]</sup>。X 射线光刻、空间技术、高能物理<sup>[3,4]</sup>以及激光引爆的惯性约束聚变(ICF)过程诊断等的需求<sup>[5]</sup>,X 射线成像技术得到迅速发展。KBA 型 X 射线显微镜<sup>[6]</sup>与通常的高斯光学系统不

同,掠入射系统的掠入射角通常少于  $2^\circ$ 。通常的光线追迹程序难于适应掠入射系统。由于掠入射系统的复杂性,用分析的方法难以给出准确的像差。

Franco Cerrina<sup>[7]</sup>编写了 SHADOW 光线追迹程序,用于对同步辐射的光源、光束线光学系统的成像进行模拟。SHADOW 软件在后来的同步辐射

收稿日期:2007-11-12;收到修改稿日期:2008-05-17

作者简介:赵玲玲(1977—),女,讲师,博士,主要从事图像处理、光学系统设计等方面的研究。

E-mail: zll765200@163.com

研究中被广泛采用<sup>[8]</sup>。

本文编写了光线追迹程序适应于非共轴掠入射 X 射线成像系统。利用这个程序可以分析系统各参数的变化对系统的高斯参数和成像质量的影响。以惯性约束聚变的掠入射 KBA X 射线显微镜为例,根据非共轴掠入射系统的特点编写了掠入射系统的像质分析程序。该程序不仅能够和通常的光学软件一样完成对掠入射系统的弥散斑等像质的分析,而且能够对非共轴掠入射系统的综合误差进行分析。

## 2 非共轴系统的程序设计

在向量公式中有关的参量都用统一的直角坐标系表示, X 轴和光轴重合,坐标原点和球面顶点重合,如图 1 所示。入射光线的几何位置采用两个向量表示:一个是表示光线上某一点  $p_b$  的位置向量  $\mathbf{P}_b$ ;另一个是沿光线进行方向的单位向量  $\mathbf{Q}_b$ ,  $p_b$  点一般为光线在球面上的投射点。每一个向量都用它们在三个坐标轴上的分量来表示

$$\begin{cases} \mathbf{P}_b(X_b, Y_b, Z_b) = X_b \hat{i}_x + Y_b \hat{i}_y + Z_b \hat{i}_z \\ \mathbf{Q}_b(\alpha_b, \beta_b, \gamma_b) = \alpha_b \hat{i}_x + \beta_b \hat{i}_y + \gamma_b \hat{i}_z \end{cases}$$

公式中  $\hat{i}_x, \hat{i}_y, \hat{i}_z$  分别为沿 X, Y, Z 三个坐标轴方向的单位向量,由于  $\mathbf{Q}_b$  是单位向量,因此它在坐标轴上的分量  $\alpha_b, \beta_b, \gamma_b$  就是它的三个方向余弦。折射光线相应地用  $\mathbf{P}_{b1}, \mathbf{Q}_{b1}$  两个向量表示

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{b1}(X_{b1}, Y_{b1}, Z_{b1}) = X_{b1} \hat{i}_x + Y_{b1} \hat{i}_y + Z_{b1} \hat{i}_z \\ \mathbf{Q}_{b1}(\alpha_{b1}, \beta_{b1}, \gamma_{b1}) = \alpha_{b1} \hat{i}_x + \beta_{b1} \hat{i}_y + \gamma_{b1} \hat{i}_z \end{cases}$$

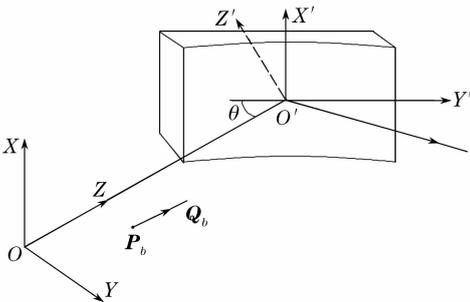


图 1 坐标变换示意图

Fig. 1 Coordinate transform

光路计算中的向量公式<sup>[9]</sup>就是在球面半径  $r$ , 折射率  $n$  和  $n'$ , 球面间隔  $d_b$  已知的条件下,给出入射光线的  $\mathbf{P}_b, \mathbf{Q}_b$  后,求折射光线的  $\mathbf{P}_{b1}, \mathbf{Q}_{b1}$ 。这个过程可以分为三个步骤:第一步,根据入射光线的位置和方向求出光线在折射球面上的投射点  $p_1$ ;第二步,求出投射点处的法线方向;第三步,根据入射光线的方向和法线方向,利用折射定律求出折射光线的方向。

KBA 显微镜为掠入射非共轴 X 射线反射成像系统,而且四块反射镜是空间分布的。前两块反射镜和后两块反射镜之间并不是严格互相垂直的,而是沿着光线的走向倾斜一个小角度,这给计算带来相当大的困难。上述共轴球面折射系统的向量公式经过调整后可以用来对 KBA 显微镜进行光路计算,但需要做如下调整:

1) 用坐标平移、旋转解决不共轴问题。如图 1 所示,对每块反射镜,计算折射光线前先把折射前的  $\mathbf{P}_b$  点坐标平移、旋转到以反射镜顶点为原点, Z 轴分别与每块反射镜共轴的坐标系下,即由 XYZ 坐标系平移、旋转到  $X'Y'Z'$  坐标系。

2) 折射系统变成反射系统。KBA 显微镜以掠入射角入射,为反射系统,所以不能把共轴球面系统的赋值方法直接用于 KBA 显微镜,需要进行修改。因为入射光线和反射光线所在的介质是一样的,都为空气,但方向相反,所以  $n = -n' = 1$ 。

鉴于 KBA 显微镜系统结构的特殊性,应用调整后的光路计算向量公式对 KBA 显微镜编写光路分析程序。由于该系统子午面的光阑和弧矢面的光阑是分离放置的,即子午面的光阑放在第二块反射镜上,弧矢面内的光阑放在第四块反射镜上。因此当分析子午面的成像质量时,主光线通过第二块反

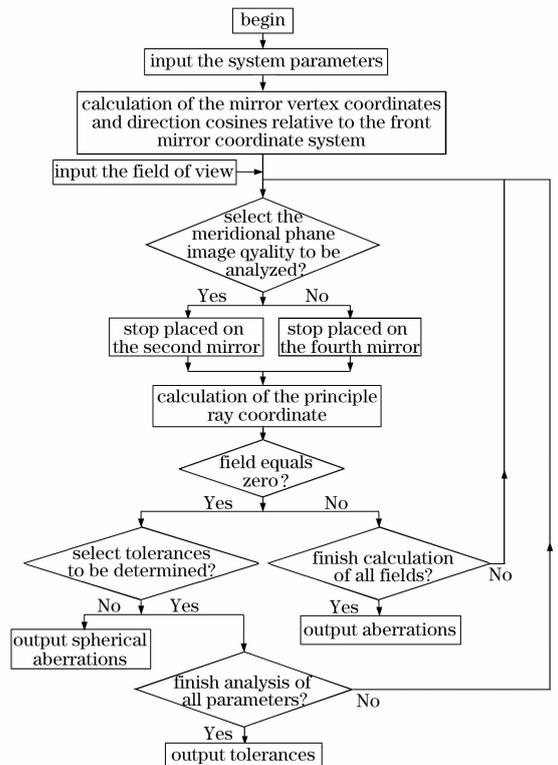


图 2 程序流程图

Fig. 2 Program flow chart

射镜中心,当分析弧矢面的成像质量时,主光线通过第四块反射镜中心。输入系统的参数就可以采用该程序对 KBA 显微镜进行光线追迹,并根据视场是否为零,计算几何像差、点列图及制定综合公差等。图 2 为 KBA 系统成像质量分析流程图。

### 3 KBA 显微镜像差分析

KBA 显微镜的结构有别于普通的光学系统,像差也有其自身的特点。采用光路分析程序对 KBA 显微镜的横向球差(图 3)和慧差(图 4)进行了分析。从图 3 可以看出,KBA 显微镜的横向球差是不对称的,随孔径的增大而增大。子午面和弧矢面横向球差的变化趋势一致,最大分别为  $38 \mu\text{m}$  和  $33 \mu\text{m}$ 。横向球差与孔径近似成二次关系,用最小二乘法逼近函数,误差不大于  $0.2\%$ 。

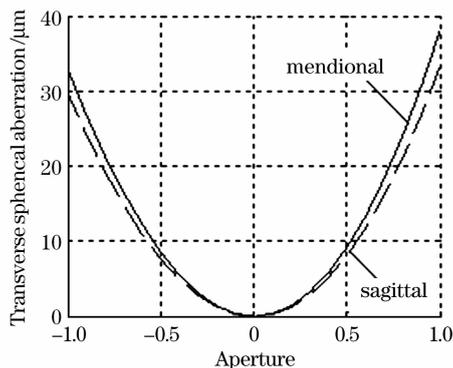


图 3 横向球差

Fig. 3 Transverse spherical aberration

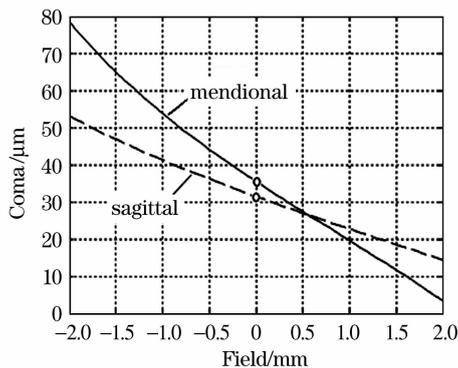


图 4 慧差

Fig. 4 Coma

从图 4 可以看出,慧差随视场的改变大致成线性关系,表明初级慧差占主导地位。在普通的光学系统中,通常子午慧差约为弧矢慧差的三倍,而在 KBA 系统中,二者的差别没有那么大。因为 KBA 系统是严重离轴的关系,不论是子午面还是弧矢面都是严重失对称的。视场从  $-2 \text{ mm}$  向  $+2 \text{ mm}$  变

化,慧差是逐渐减少的。子午面和弧矢面最大的慧差值分别为  $79 \mu\text{m}$  和  $53 \mu\text{m}$ 。

KBA 显微镜还存在比较大的像差,属于大像差系统。采用适合于大像差系统的点列图对我们所设计的 KBA 显微镜制定综合公差。

### 4 KBA 显微镜综合误差分析

KBA X 射线显微镜的半径非常大,为了便于加工和测量,KBA 系统的四块反射镜被固定在同一磨盘上,因此产生的半径误差相同。KBA 显微镜是非共轴掠入射系统,并且是在空间受限制的真空壳体内对靶标成像。由于它的焦深很大,装调时可以采用尺子直接测量物距,测出的物距会产生误差。在我们设计的 KBA 系统中,子午面双反射镜的掠入射角  $\theta_1 = 1.6^\circ$ ,角度很小,因此对掠入射角的控制是非常难的问题,掠入射角误差的产生不可避免。同样,由于 KBA 系统是非共轴掠入射系统,装调时,双反射镜之间的夹角肯定会产生误差。系统中各元件的参数和它们的相互位置产生的误差会降低系统的成像质量。这种因加工和装配误差引起的质量降低是有限度的,超过这个限度是不允许的。

#### 4.1 反射镜半径误差的影响

由于 KBA 系统子午面和弧矢面的成像规律一致<sup>[10]</sup>,只以子午面为例分析半径与其余参数误差对像质的综合影响。图 5(a)为反射镜半径与物距的综合误差对像质影响。反射镜半径越大,物距越大,弥散斑直径越小。弥散斑直径与反射镜半径和物距成线性比例关系变化。当物距公差在  $-0.4 \sim +1 \text{ mm}$  时,反射镜半径在  $100 \text{ mm}$  内,弥散斑的变化基本上是在允许的范围内。图 5(b)为反射镜半径与双反射镜夹角的综合误差对像质的影响。反射镜半径越大,双反射镜夹角越大弥散斑直径越大。弥散斑直径与反射镜半径和双反射镜夹角成线性比例关系变化。当双反射镜公差在  $-20'' \sim 0$  时,反射镜半径在  $100 \text{ mm}$  内,弥散斑的变化基本上是在允许的范围内。图 5(c)为半径与掠入射角的综合误差对像质的影响。反射镜半径及掠入射角对弥散斑的影响很大。当掠入射角公差在  $-8'' \sim 0$  时,反射镜半径在  $100 \text{ mm}$  内,弥散斑的变化基本上是在允许的范围内。

#### 4.2 物距误差的综合影响

图 6(a)为物距与双反射镜夹角误差同时存在时的成像情况。可以看出,双反射镜夹角越大,物距越小,弥散斑直径越小。弥散斑直径与物距和双反

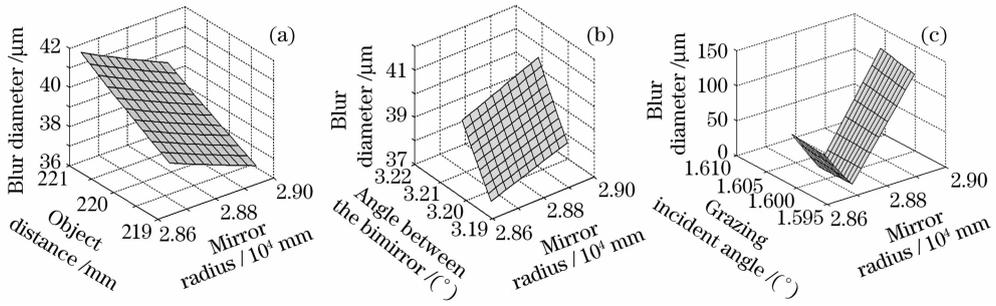


图 5 半径与物距的综合误差(a),半径与双反射镜的夹角(b)及半径与掠入射角(c)对像质的影响  
Fig. 5 Blur diagram of the mirror radius and the object distance (a), the angle between bimirror (b), the grazing incident angle (c)

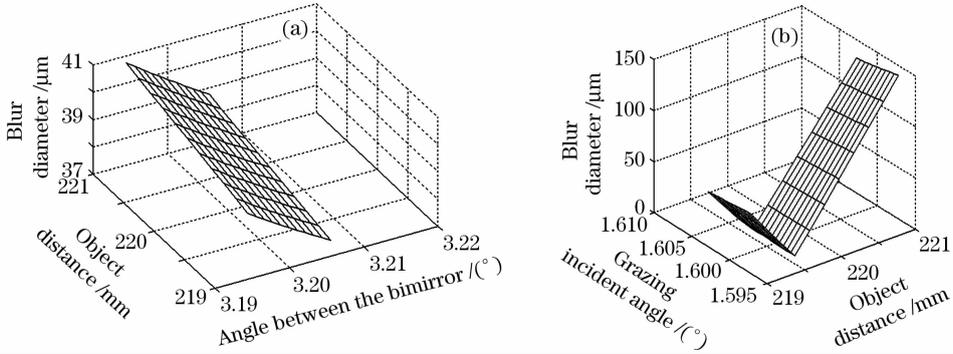


图 6 物距和双反射镜夹角(a)及物距和掠入射角(b)对成像的影响

Fig. 6 Blur diagram of the object distance and the angle between the bimirror (a), the grazing incident angle (b)

射镜夹角成线性比例关系变化。当物距公差为  $-0.4 \sim +1$  mm, 双反射镜夹角公差为  $-20'' \sim 20''$  时, 弥散斑的变化基本上是在允许的范围内。图 6 (b) 为物距与掠入射角误差同时存在的成像情况。可以看出, 当物距公差为  $\pm 1$  mm, 掠入射角范围为  $-8'' \sim 0''$  时, 弥散斑的变化基本上是在允许的范围内。

### 4.3 掠入射角误差的影响

KBA 系统在子午面内的物像关系主要取决于

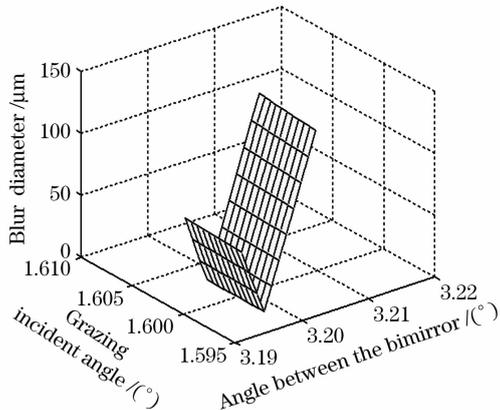


图 7 双反射镜夹角和掠入射角对成像的影响  
Fig. 7 Blur diagram of the grazing incident angle and the angle between the bimirror

子午面双镜, 所以掠入射角  $\theta_1$  的误差主要影响子午面的成像质量。图 7 是当掠入射和双反射镜夹角同时存在时对成像质量的影响。可以看出, 双反射镜夹角为  $-20'' \sim 20''$ , 掠入射为  $-8'' \sim 0''$  时, 弥散斑的变化基本上是在允许的范围内。

## 5 结 论

根据 KBA 显微镜系统掠入射非共轴的特点, 编写了分析 KBA 系统的光线追迹程序。应用该光路计算程序进行大量的光路计算, 可以分析 KBA 显微镜的像差及综合公差等。由 KBA 系统的综合公差分析可以得出, 由于 KBA 系统是非共轴掠入射系统, KBA 系统的综合公差是非对称的。为了保证 KBA 系统的成像质量, 在装调过程中要控制 KBA 系统的综合公差。在对综合公差分析的指导下, 研制了一套高精度的非共轴掠入射 X 射线显微镜。

## 参 考 文 献

1 Hu Jiasheng, Cheng Lihong, Cao Leifeng *et al.*. Image reconstruction with high resolution in X-ray coded aperture imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12):1611~1615  
胡家升, 程丽红, 曹磊峰 等. X 射线编码孔径成像中的一种高精

- 度图像重构方法[J]. 光学学报, 2005, **25**(12):1611~1615
- 2 Lang Haitao, Liu Liren, Yang Qingguo. A three-dimensional imaging method based on the principle of coded aperture imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):34~38  
郎海涛,刘立人,阳庆国. 一种基于编码孔径成像原理的三维成像方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(1):34~38
  - 3 Yu Yong-ai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):255~258  
于永爱,张玲玲,唐前进等. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2):255~258
  - 4 Gao Yanxia, Zhao Gaiqing. Optical parametric amplification in periodically poled LiNbO<sub>3</sub> for high energy perawatt laser system front end [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1092~1094  
高艳霞,赵改清. 用于高能拍瓦激光系统前端的周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 光参量放大[J]. 中国激光, 2007, **34**(8):1092~1094
  - 5 Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):466~470  
林宏奂,隋展,王建军等. 啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形[J]. 光学学报, 2007, **27**(3):466~470
  - 6 Hu Jiasheng, Zhao Lingling, Li Xiang. Design and analysis of X-ray microscope of four mirrors working at grazing incidence [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(5):534~537  
胡家升,赵玲玲,李祥. 非共轴掠入射 X 射线显微镜的设计与分析[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(5):534~537
  - 7 Juihsiang Pei, C. H. Pruet. Optical design for Seya-Namioka beamline at SRC[J]. *Chinese J. Physics*, 1995, **33**(6):659~666
  - 8 Lijun Lu. Raytracing facility for soft x-ray and vacuum ultraviolet monochromators at NSRL [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1994, **65**(12):3661~3666
  - 9 Yun Xuchang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. 11~15  
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1988. 11~15
  - 10 Zhao Lingling, Hu Jiasheng, Li Xiang. Error analysis on the parameters of non-coaxial grazing X-ray microscope [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2006, **14**(1):34~42  
赵玲玲,胡家升,李祥. 非共轴掠入射 X-射线显微镜参数的误差分析[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(1):34~42

## 《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于2009年12月正刊上推出“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光制造”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

截稿日期:2009年9月30日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“激光制造”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shnc.ac.cn(主题标明“激光制造”投稿),详情请参见中国光学期刊网:[www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请发邮件至 zhgjg@mail.shnc.ac.cn 询问。

《中国激光》编辑部