

文章编号: 0253-2239(2008)09-1730-05

离焦激光直写的线宽稳定方法

金占雷 谭久彬 张 山 王 雷

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为了提高激光直写加工衍射光学元件时的线条质量,提出一种离焦激光直写的线宽稳定方法。该方法通过同时调节激光功率和离焦量,使光刻胶的曝光阈值处于线宽对曝光量的变化率较小位置,从而可以弱化线宽对实际曝光量或光刻胶阈值等变化的敏感度,提高利用离焦方法进行衍射光学元件制作时的线宽稳定性。推导了稳定线宽后的光功率控制模型和线宽模型,模型中的变量仅为离焦量,降低了光功率控制的复杂性。利用 632.8 nm 的 He-Ne 激光和 $NA=0.1$ 的物镜在 CCD 上对采用该方法后的离焦线宽模型进行验证,实验结果与理论模型吻合较好。该方法对于线宽稳定度较高的衍射光学元件制作具有重要价值。

关键词 集成光学; 线宽稳定性; 光功率控制; 离焦激光直写; 衍射光学元件

中图分类号 TN249; TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1730

Research of Linewidth Stabilizing Method During Defocusing Laser Direct Writing

Jin Zhanlei Tan Jiubin Zhang Shan Wang Lei

(*Institute of Ultra-Precision Optical & Electronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China*)

Abstract A linewidth stabilizing method for defocusing laser direct writing is proposed for further improvement of line quality of diffractive optical elements. The writing power and defocusing amount are synchronously adjusted to set photoresist threshold at the position where the linewidth variation rate is small, thereby the linewidth sensitivity to variation of actual exposure dose and photoresist threshold is weakened, and then the linewidth stability during defocusing laser direct writing is guaranteed. Both the power control model and linewidth model of the proposed method are established with defocusing amount as the unique variable. The verification of linewidth model was carried out on CCD with laser wavelength of 632.8 nm and objects of numerical aperture 0.1, and it shows that the experimental result is in good agreement with that by theoretical model. The proposed method is of great significance for fabrication of high-stability diffractive optical elements.

Key words integrated optics; linewidth stability; light power control; defocusing laser direct writing; diffractive optical element

1 引 言

在各种微光学元件的加工方法^[1~4]中,激光直写系统由于无需掩模、加工精度高等优点,是目前制作衍射光学器件、二元光学元件等微光学器件的关键设备之一^[5~8]。离焦激光直写由于其光斑大小可调的特性被广泛应用于复杂光学元件的超精密直写

加工中^[9~14]。David K. Poon 等^[10]利用光斑修整和离焦技术消除了直写加工掩模时在 Bi/In 上形成的纹路;Y. Cheng 等^[11]通过离焦技术使厚胶光刻中加工出来的线条侧壁角更陡;李凤有等^[13]通过离焦方法在四轴光刻机上制作了光栅和网格;梁宜勇等^[14]则在离焦状态下制作了线宽 3 μm 的均匀螺旋

收稿日期: 2007-10-26; **收到修改稿日期**: 2008-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(50675052)资助课题。

作者简介: 金占雷(1980-),男,博士研究生,主要从事超精密驱动控制及激光直写光刻技术等方面研究。

E-mail: jinzhanlei@hit.edu.cn

导师简介: 谭久彬(1955-),男,教授,博士生导师,主要从事超精密测量技术与仪器工程等方面的研究。

E-mail: jbtan@hit.edu.cn

线。由于离焦激光直写技术在变线宽元件制作方面的广泛应用,一些学者研究了离焦激光直写的线宽特性^[15,16]。日本学者 Onda Hajime^[15]利用光强分布建立了离焦直写的线宽静态高斯模型;李凤有等^[13]对离焦量和线宽进行了实验研究;梁宜勇等^[16]在假设光刻胶内的光强符合高斯分布的前提下利用曝光量分布建立了线宽动态高斯模型。以上研究都没有很好地考虑直写线宽的稳定度,在有些场合对线宽量级的要求并不高,但对线宽的稳定度却有很高的要求,如何提高线宽稳定度是一个具有重要研究价值的方向^[17]。梁宜勇在另外的研究中针对聚焦情况提出一种稳定线宽的过曝光控制方法^[17]很好地保证了直写线宽的稳定度,但是该研究没有考虑离焦直写的情况。因此寻找一种保证离焦激光直写线宽稳定性的方法对于提高衍射光学元件的质量具有非常重要的意义。

本文在假设离焦面的光振幅服从高斯分布的前提下提出一种稳定离焦激光直写线宽的方法,该方法通过同时调节直写激光功率和离焦量,使光刻胶的曝光阈值处于线宽变化较小的位置。推导了采用该稳定线宽方法后的光功率控制模型和离焦线宽模型,当工作台速度 v 恒定且线宽的稳定度确定时,该线宽模型和光功率控制模型可由离焦量 δ 唯一确定,降低了控制的复杂性。

2 稳定离焦直写线宽的光功率控制模型和线宽模型

假设入射高斯光束经过物镜变换后仍服从高斯分布^[16],光振幅分布可表示为

$$U(\rho, \delta) = A_0 \exp[-\rho^2 / w_\delta^2], \quad (1)$$

式中 w_δ 为不同离焦位置的光斑大小:

$$w_\delta = w_g \left[1 + \left(\frac{\delta \lambda}{\pi w_g^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 λ 为入射光束的波长, δ 代表离焦量,即物镜焦平面到光刻胶上表面的距离, w_g 为物镜变换后的高斯光束束腰半径, ρ 为观察屏上任意点到光强中心的距离, A_0 为激光振幅。

焦平面附近的光强分布满足

$$I(\rho, \delta) = A_0^2 \exp\left[-\frac{2\rho^2}{w_\delta^2}\right] = \frac{2P}{\pi w_\delta^2} \exp\left[-\frac{2\rho^2}{w_\delta^2}\right], \quad (3)$$

式中 P 为物镜的透射功率。

假设光斑沿 x 轴方向作匀速运动,如图 1 所示,则光刻胶内任意点的曝光量分布为

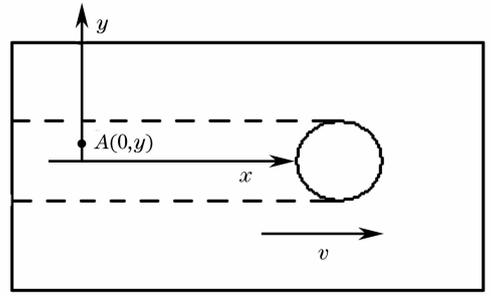


图 1 直角坐标激光直写原理

Fig. 1 Laser direct writing principle in Cartesian coordinate

$$D(y, \delta) = \int_0^{+\infty} I(\rho, \delta) dt = \frac{2}{v} \int_0^{+\infty} I(\sqrt{x^2 + y^2}, \delta) dx, \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式得

$$D(y, \delta) = \frac{4P}{\pi w_\delta^2 v} \exp\left(-\frac{2y^2}{w_\delta^2}\right) \int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{2x^2}{w_\delta^2}\right) dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{w_\delta v} \exp\left(-\frac{2y^2}{w_\delta^2}\right). \quad (5)$$

由于高斯曲线上凸下凹,存在拐点,从整条曲线来看,拐点处的斜率最大(图 2 曲线 1),此时

$$D'(y, \delta) = -\frac{4\sqrt{2\pi}}{\pi} \frac{P}{w_\delta^3 v} \exp\left(-\frac{2y^2}{w_\delta^2}\right) y, \quad (6)$$

$$D''(y, \delta) = \frac{4\sqrt{2\pi}}{\pi} \frac{P}{w_\delta^3 v} \left(\frac{4y^2}{w_\delta^2} - 1\right) \exp\left(-\frac{2y^2}{w_\delta^2}\right) = 0, \quad (7)$$

由(7)式求得拐点位置为

$$y = w_\delta / 2. \quad (8)$$

拐点处的曝光量大小为

$$D\left(\frac{w_\delta}{2}, \delta\right) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{w_\delta v} \exp\left(-\frac{1}{2}\right) = 0.606 D(0, \delta). \quad (9)$$

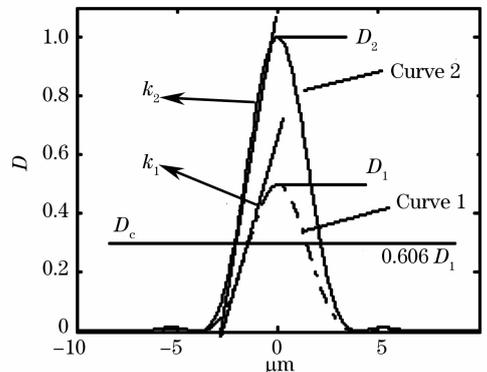


图 2 增大激光输出功率对直写位置曝光量变化率的影响

Fig. 2 Exposure dose variation rate at writing point versus writing power

然而,由(6)式可知,曝光量的变化速率与输出功率 P 有关,从图2中可以看出,当输出功率 P 增大时,曝光量分布曲线形状不变,曝光量最大值由 D_1 逐渐增加至 D_2 ,而光刻胶的曝光阈值 D_c 不变。对比 k_1 和 k_2 可以看出,虽然光刻胶阈值不在曲线2的拐点处,曲线2在直写位置的斜率仍然比曲线1大(光刻胶曝光阈值位置的曝光量分布曲线斜率绝对值越大,线宽随曝光量改变的变化率越小,线宽越稳定)。因此,当曝光量分布拐点与曝光阈值重合时,直写线宽的稳定性并非最高。

由(5)式可得相应的线宽:

$$L = 2y = \sqrt{2}w_\delta \sqrt{\ln \beta}, \quad (10)$$

式中 β 为曝光量最大值 $D(0, \delta)$ 与曝光阈值 D_c 的比值:

$$\beta = D(0, \delta) / D_c, \quad (11)$$

$$D(0, \delta) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{w_\delta v}, \quad (12)$$

由(10)式可得直写线宽的变化率:

$$L'_\beta = \frac{\sqrt{2}}{2} w_\delta \frac{1}{\sqrt{\ln \beta} \cdot \beta}. \quad (13)$$

从图3可以看出,随着 β 的增大曝光线条宽度相对于实际曝光量变动的稳定性逐渐增加。由于激

光器的最大输出功率是固定的,且声光调制器的调节范围有限,当 β 太大时,将极大地增加声光调制器的负担。因此,合理地选择 β 值,可以在稳定线宽同时不过多地增加声光调制器调节负担。由图3(a)可知,在 $L' = 1$ 左侧时线宽随曝光量变化的波动较大;而在右侧且远离 $L' = 1$ 时虽线宽具有较好的稳定性,但是对声光调制器的调节范围具有很高的要求。因此本文折衷将 $L' = 1$ 对应的 β 作为线宽稳定的直写位置,既可以保证良好的线宽稳定性,又可以降低声光调制器的调节范围。

由(2)式、(10)式~(12)式可以得到采用该方法进行激光直写时的线宽模型和光功率控制模型:

$$L = 2y = \sqrt{2}w_\delta \left[1 + \left(\frac{\delta \lambda}{\pi w_\delta^2} \right)^2 \right]^{1/2} \sqrt{\ln \beta}, \quad (14)$$

$$P = \sqrt{\frac{\pi}{2}} w_\delta \left[1 + \left(\frac{\delta \lambda}{\pi w_\delta^2} \right)^2 \right]^{1/2} D_c \beta v, \quad (15)$$

式中 β 为(13)式的解,该式没有解析解,利用数值方法可得到 β 的数值解。此时的光强分布和曝光量分布满足

$$I = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\beta}{w_\delta} D_c v \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w_\delta^2}\right), \quad (16)$$

$$D = \beta D_c \exp\left(-\frac{2y^2}{w_\delta^2}\right). \quad (17)$$

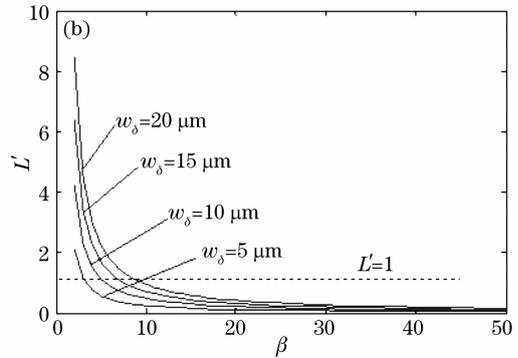
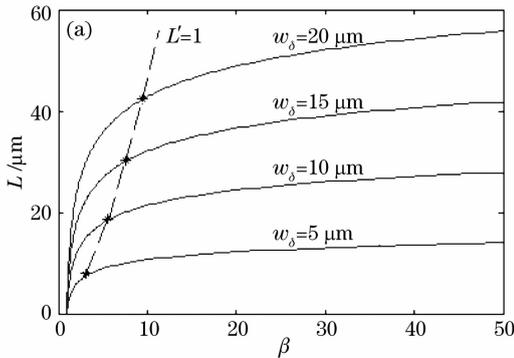


图3 不同 w_δ 下 β 变化对 L 的影响。(a) L 与 β 关系, (b) L' 与 β 关系

Fig. 3 Variation of L with β for different w_δ . (a) Relationship between L and β , (b) relationship between L' and β

3 实验与讨论

在 CCD 上对本文提出方法的线宽模型和光功率控制模型进行验证,实验用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光,测得声光调制器输出 1 级光的最大光功率为 1 mW,直写物镜数值孔径 $NA=0.1$ 。激光器发出的激光束,经过声光调制器后分成 0 级光和 1 级光,使用 1 级光进行直写,为了防止 CCD 饱和,选用 0.1% 的滤光片对 1 级光进行能量衰减,衰减后的激光束透过 $NA=0.1$ 的直写物镜,在 CCD 上

形成具有亮度梯度的光斑。CCD 大小为 1392 pixel \times 1040 pixel,像素大小为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$,采样频率 15 Hz,考虑到 CCD 的像素尺寸较大等因素,在直写物镜和 CCD 之间放置 $NA=0.5$ 的放大物镜对直写光斑进行放大,实际测得放大倍率为 39.6。

实验测得直写物镜聚焦后高斯光束的束腰为 $9 \mu\text{m}$ 。通过三维工作平台和压电陶瓷调节物镜位置,使光斑正好聚焦在 CCD 上,然后调节声光调制器的输出,使 CCD 的亮度处于未饱和状态,用光功率计

测得此焦点位置的光功率大小。由(16)式可知,不同离焦量对应的光功率只相差一个系数,因此根据焦点位置的光功率可以求得不同离焦位置的光功率大小。同时调节离焦量和光功率,在 CCD 上可以得到不同离焦位置的光斑大小其光强分布(如图 4)。

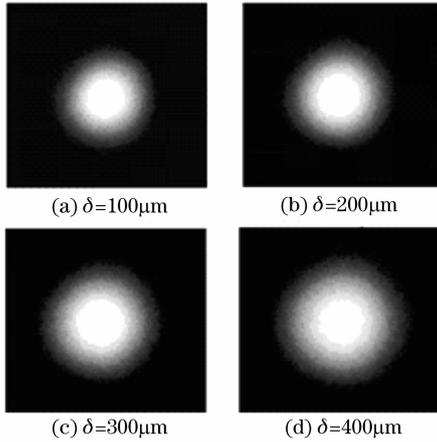


图 4 实际测得的光斑大小及亮度

Fig. 4 Actual size and brightness of writing spot

实验中光斑以 $100 \mu\text{m}/\text{s}$ 的速度匀速运动, CCD 实时采集光强 I_i , 将得到的光强与 CCD 每帧的采样时间相乘后相加, 即可获得采样点的曝光量:

$$D = \int_0^{t_0} I dt = \sum I_i \Delta t = 1/15 \sum I_i, \quad (18)$$

曝光量分布图形在光刻胶阈值位置的宽度大小即为激光直写的线宽。实际测得的离焦量在 $0 \sim 800 \mu\text{m}$ 范围内直写线宽如图 5 所示, 可以看出, 实验结果与仿真结果在离焦量较大时吻合较好, 而在离焦量较小时存在一定误差, 这主要是因为实际光斑和理想高斯光斑有一定的误差。

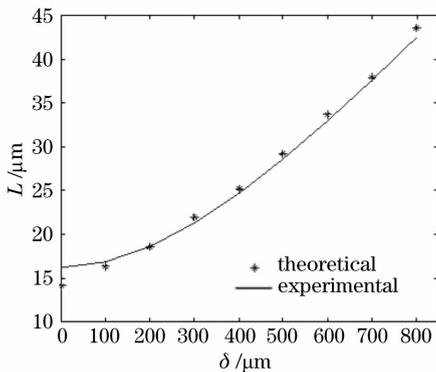


图 5 实验线宽与理论线宽对比

Fig. 5 Comparison of experimental linewidth and theoretical linewidth

4 结 论

线宽的稳定性是激光直写时影响线条质量的重要因素, 本文提出了离焦激光直写时稳定线宽的方法, 有效地减小了离焦激光直写时光刻胶曝光阈值变化和曝光量计算误差对线宽稳定度的影响。推导了采用该方法后的线宽模型和光功率控制模型, 并利用 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的 He-Ne 激光和 $NA = 0.1$ 的物镜在 CCD 上对线宽模型进行了验证, 实验结果与理论模型吻合较好, 证明了该模型的正确性。该方法对于线宽稳定度要求较高的衍射光学元件制作具有重要价值。

参 考 文 献

- Ni Wei, Wu Xingkun. Soft-lithography-based inter-chip optical interconnection circuit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 813~818
- 倪 玮, 吴兴坤. 基于软光刻的片间光学互连线路[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 813~818
- He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 595~622
- 何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 595~622
- Liu Jiajun, Wang Zemin, Li Aikui *et al.*. Thresholds of laser power density in fabricating strip optical waveguides by laser direct writing method [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(6): 765~770
- 刘家骏, 王泽敏, 李爱魁等. 激光直写法制备条形光波导中的功率密度阈值[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 765~770
- Li Yang, Chingyue Wang, Xiaochang Ni *et al.*. Aluminum film microdeposition at 775 nm by femtosecond laser-induced forward transfer [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 308~310
- Chen Linsen, Shao Jie, Wang Xuehui *et al.*. A new laser direct writing method of binary beams-shaping element [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 346~348
- 陈林森, 邵 洁, 王雪辉等. 一种二元整形元件激光直写方法的实验研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 346~348
- S. J. Henley, S. R. P. Silva. Laser direct write of silver nanoparticles from solution onto glass substrates for surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(2): 023107
- Kock Khuen Seet, Vygandas Jarutis, Saulius Juodkazis *et al.*. Nanofabrication by direct laser writing and holography [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **6050**: 60500S
- Liang Fengchao, Hu Jun, Xu Zhijun. Realization of electric control of laser direct writing mesh on concave spherical substrate [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 792~796
- 梁凤超, 胡 君, 续志军. 激光直写凹球面网栅的电控实现[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 792~796
- Cynthia L. Vernold, Thomas D. Milster. Non-photolithographic fabrication of large computer-generated diffractive optical elements [C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2263**: 125~133
- David K. Poon, Glenn H. Chapman, Chiheng Choo *et al.*. Expanding grayscale capability of direct-write grayscale photomask by using modified Bi/In compositions [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5992**: 59920K

- 11 Y. Cheng, T. Huang, C.-C. Chieng *et al.*. Thick-film lithography using laser write [J]. *Microsystem Technologies*, 2002, **9**: 17~22
- 12 Yuen-Chuen Chan, Yee-Loy Lam, Yan Zhou *et al.*. Development and applications of a laser writing lithography system for maskless patterning [J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(9): 2521~2530
- 13 Li Fengyou, Lu Zhenwu, Xie Yongjun *et al.*. Photolithographic fabrication techniques by using defocusing laser direct wiring [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(9): 850~854
李凤友, 卢振武, 谢永军等. 离焦激光直写光刻工艺研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9): 850~854
- 14 Liang Yiyong, Yang Guoguang, Sun Rong. Research on focusing system characteristics and defocusing application in laser direct writer [J]. *J. Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, **39**(2): 269~272
梁宜勇, 杨国光, 孙 戎. 激光直写调焦系统特性及离焦应用研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, **39**(2): 269~272
- 15 Onda Hajime. Line width control on laser beam writing (second report); Line width control by defocusing [J]. *J. Japan Society of Precision Engineering*, 1999, **65**(8): 1158~1162
- 16 Liang Yiyong. Dynamic Gaussian model of linewidth in defocus writing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 726~729
梁宜勇. 离焦写入线宽的动态高斯模型 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 726~729
- 17 Liang Yiyong, Gu Zhiqi, Zhang Zheming *et al.*. Overexposure control for stabilizing linewidth [J]. *J. Zhejiang University*, 2006, **40**(1): 49~52
梁宜勇, 顾智企, 章哲明. 稳定线宽的过曝光控制 [J]. *浙江大学学报*, 2006, **40**(1): 49~52

“2008 年度中国光学重要成果”征稿启事

《激光与光电子学进展》是中科院上海光机所主办的的科技进展类期刊,中文核心期刊,创刊于 1964 年,是国内第一本激光领域的专业期刊。本刊以及时报道国内外激光与光电子学领域科技的最新研究成果与技术应用为宗旨,促进国内外学术交流,沟通科研与产业的联系。

《激光与光电子学进展》的重点栏目——“年度中国光学重要成果”旨在介绍中国光学领域科研人员在国际著名物理学、光学期刊(如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Opt. Lett.* 等)发表的部分具有重要学术、应用价值的论文。本栏目得到了包括众多著名科学家在内国内一流研究人员的肯定和支持,“2007 中国光学重要成果”发布会上,国家科技部副部长、《光学学报》主编曹健林,中国光学学会理事长、《中国激光》主编周炳琨院士,《激光与光电子学进展》主编范滇元院士,中科院上海光机所所长朱健强等为获奖代表颁奖。

为了让读者了解 2008 年度我国光学领域科研人员的最新研究成果,扩大这些成果在国内的影响,本刊 2009 年第 2 期继续推出 2008 年度中国光学重要成果栏目,现向全国在光学领域在国际知名刊物发表论文的专家、学者征稿。征稿说明如下:

1. 来稿条件:研究成果已发表在 2008.01.01~2008.12.31 日以来出版的国际知名物理学、光学刊物上,如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Appl. Phys. Lett.*,

Opt. Lett. 等;

2. 稿件格式:最多不超过 1 500 字,不超过 2 张图片。必须用中文,语言简洁易懂,不必提供过多技术细节,尽量避免使用公式,最好选用彩色图片,参考文献不超过 5 篇,文章结尾处注明作者发表论文的出处,论文格式可参考中国光学期刊网。并注明来稿的创新之处;

3. 请作者标出所投论文的所属研究领域,如自适应光学、生物光子学、探测器、衍射光学、光纤光学、纳米光学、非线性光学、光学工程、光子结构、光传播、量子光学、半导体光学、超快光学等;投稿应该包括作者的姓名、单位和联系方式;

4. 录用稿件不收取任何审稿费、版面费,投稿截止日期 2008.12.31;

5. 投稿方式

在线投稿: www.opticsjournal.net/lop.htm

E-mail: lop@siom.ac.cn;

6. 说明:为了能全面反映国内光学领域的研究成果,本栏目只接受每个研究小组的一篇报道,但该报道可以介绍一个或几个相关的研究成果;本次活动入选论文将在 2009 年 3 月向社会公布并向入选作者颁奖。

《激光与光电子学进展》编辑部

2008-06-23