

文章编号: 0253-2239(2006)07-1107-5

膜厚监控误差及监控片不均匀对膜厚监控的影响

朱美萍^{1,2} 易 葵¹ 郭世海¹ 范正修¹ 邵建达¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 借助于 VC++ 编程从理论上模拟分析了膜厚监控误差以及监控片不均匀性对光学膜厚监控的影响。结果表明,膜厚监控误差和监控片的不均匀性都对监控曲线有影响;随着膜层层数的增加,监控片不均匀性逐渐增大。实验制备了多层规整薄膜并对其监控曲线进行了分析,分析表明考虑到膜厚监控误差和监控片不均匀性后计算的光学监控曲线和镀膜过程实测光学监控曲线吻合较好。这说明膜厚监控误差和监控片不均匀性是引起监控曲线与理论值偏离的重要因素。介绍了如何计算考虑膜厚监控误差和监控片不均匀性后的理论监控曲线。这将对膜厚自动监控,尤其是对非规整膜系的自动监控具有重要的指导意义。

关键词: 薄膜光学;膜厚监控;误差分析;不均匀性;规整膜系;非规整膜系

中图分类号: O484 文献标识码: A

Effect of Thickness Monitoring Error and Inhomogeneity of Witness Glass on Film Thickness Monitoring

Zhu Meiping^{1,2} Yi Kui¹ Guo Shihai¹ Fan Zhengxiu¹ Shao Jianda¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: By the aid of VC++, the influence of thickness monitoring error and witness glass inhomogeneity on the thickness monitoring of optical films is analyzed. It is found that both thickness monitoring error and witness glass inhomogeneity have effect on the thickness monitoring of optical thin films, and the inhomogeneity of witness glass increases with increase of coating layers. Then a multi-layer coating is fabricated and its monitoring curve is analyzed, it is shown that the theoretical monitoring curve which takes thickness monitoring error and inhomogeneity of witness glass into account is close to the experimental monitoring curve, and such a conclusion is got that thickness monitoring error and witness glass inhomogeneity are the important factors which cause the deviation of experimental monitoring curve from theoretical one. In the end, the calculation method of theoretical monitoring curve is proposed, in which thickness monitoring error and witness glass inhomogeneity error are taken into account. The results are of importance for the automatic thickness monitoring of thin films, especially of non-quarter wave coatings.

Key words: thin film optics; film-thickness monitoring; error analysis; inhomogeneity; quarter-wave coating; non-quarter-wave coating

1 引 言

膜厚监控作为光学薄膜制备中的一项关键技术引起了人们越来越多的重视^[1,2]。目前的真空镀膜设备大多使用基于单波长的光电极值法监控膜层厚度,即通过在薄膜的沉积过程中观察监控片透射(反射)率值的周期性变化来对膜层的光学厚度进行实时监控。随着膜层的增加,理论预测的极值和实际

测得的极值有越来越大的偏离。沉积技术、膜厚控制方法、膜厚控制系统的精度、监控片上膜厚的不均匀性以及其它的一些参量的不确定性等都会造成这种偏离。越来越多的设备开始采用计算机程序来进行膜厚自动监控。然而这种实际监控曲线和理论监控曲线的偏离,增加了非规整膜系自动控制的难度。实际监控曲线和理论监控曲线偏离的分析与膜厚容

作者简介:朱美萍(1982~),女,江苏海安人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事实时光学膜厚监控系统的研究。E-mail: bree@siom.ac.cn

收稿日期:2005-09-20;收到修改稿日期:2005-11-15

差分析及光谱宽度引起的膜厚监控误差是不同的。膜厚容差分析的研究已较成熟,目前已有各种容差分析的软件可供各种膜系的模拟计算;膜厚监控系统的光谱宽度对窄带滤光片的性能的影响也有研究^[3],但是对镀膜过程中的实际监控曲线与理论监控曲线的偏离问题很少系统的研究。

本文分析了规整膜系厚度控制误差和监控片的不均匀性对光学监控的影响,这里监控片不均匀性是指在监控片的整个平面内膜厚的不均匀分布。并利用 VC++ 编写了程序来实际模拟规整膜系控制误差以及监控片的不均匀性对光学监控的影响,并与实验结果进行了对比分析。

2 膜厚控制误差分析

由于镀膜设备、工艺条件以及光学膜厚监控装置精度等因素的限制,通常难以使膜厚严格控制在理论上值。某一膜层厚度控制产生误差,不仅其本身的厚度偏离要求值,而且影响后续镀制膜层的厚度。利用计算机模拟方法,赋予膜系各层所产生的误差,模拟镀膜过程中膜厚控制的实际情况,计算各层膜厚的变化,并分析相应膜系的透过率光谱曲线,可以对光学薄膜的制备进行理论指导。

根据薄膜光学理论,膜系的特征矩阵^[4]为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{K+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 η_j 为第 j 层膜的导纳, η_{K+1} 为基片的导纳, δ_j 为第 j 层膜的相位厚度。膜层的透过率为

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{K+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (2)$$

反射率为

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*. \quad (3)$$

另外,计算实时监控曲线还必须考虑基片背面反射的影响,考虑到背面反射后修正可用(4)式^[5]来表示监控光透过率(光线垂直入射到基片)

$$T = 1 - R = 1 - R_0 - \frac{R_1(1 - R_0)^2}{1 - R_0 R_1}, \quad (4)$$

式中 T 和 R 均为修正过的薄膜监控特性, R_1 为未考虑背面反射时的反射率, R_0 为基片背面的反射率,当基片背面没有镀膜时,

$$R_0 = \left(\frac{n_A - n_G}{n_A + n_G} \right)^2, \quad (5)$$

其中 n_A 为空气的折射率, n_G 为基片的折射率。

利用麦克劳德等人提出的误差分析方法,通过在

膜系中引入服从正态分布的随机误差,按各层膜厚的随机误差连续计算膜系的光学特性。设 ΔT 是控制的透过率误差,它服从正态分布。根据随机变量的抽样理论,利用计算机产生在 $(0,1)$ 之间均匀分布的随机数 ν_1 和 ν_2 ,再借助变换抽样法得到接近于 $N(0,1)$ 正态分布的随机数 $\mu = (-2 \ln \nu_1)^{1/2} \cos(2\pi \nu_2)$,假设监控时透过率的标准偏差为 σ ,则每层的透过率误差为 $\Delta T_i = \mu_i \sigma (i=1,2,\dots,n)$ 。如果为规整膜系且采用一致性过正控制,过正量为 ΔT_0 ,那么每一层膜的透过率误差为 $\Delta T_i = \Delta T_0 + \mu_i \sigma$ ^[6]。

膜层的折射率误差的分布比监控信号误差要复杂得多,它不仅具有随机误差,而且还有一些很难把握的动态系统误差。但是只要严格控制薄膜的某些制备参量(真空度、基板温度及淀积速率等)并保证重复性,膜层的实际折射率可趋于起伏不大的定值,也就是说,膜层的折射率在同样的工艺因数下是一个变化不大的随机值,可以在薄膜沉积的电脑仿真中视为定值^[7]。

以膜系 G/HLHLHLHLH/A 为例来计算膜厚监控误差对光学监控的影响,其中 G 和 A 分别表示基底和空气, H、L 分别表示光学厚度为 $\lambda/4$ 的高低折射率膜层,膜系结构参量为 $n_H = 1.96, n_L = 1.46, n_A = 1, n_G = 1.52, \lambda = 500 \text{ nm}, \theta_0 = 0$ 。

图 1 所示的为一致性过正控制量为 0.2% 时,用计算机模拟包含随机膜厚监控误差的各膜层的光学厚度值。假设镀制每层膜的时间相同,且每层按相同的时间间隔采集 100 个点的透过率,以采样的点数为横坐标,采样的监控片透过率为纵坐标绘制监控曲线。图 2 中虚线为未考虑膜厚监控误差时的理论监控曲线。其余实线为考虑膜厚监控误差后计算机模拟 10 次的监控曲线。图中曲线基本重叠,可

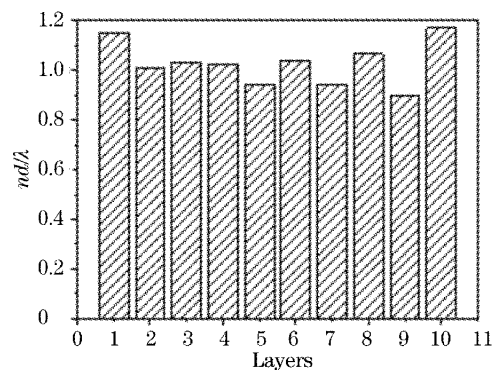


图 1 考虑误差后的膜层厚度

Fig. 1 Layer thickness taking monitoring error into account

以看出,当折射率稳定,且采用一致性过正控制时,随机监控误差对监控曲线有影响,但是影响并不大。图 3 中虚线所示的为未考虑误差时的理论光谱曲线,其余实线为考虑随机监控误差时计算机模拟 10 次的光谱曲线。从图中可以看出,考虑随机膜厚监控误差后的光谱曲线和未考虑误差的光谱曲线在中心波长处的偏差不大。

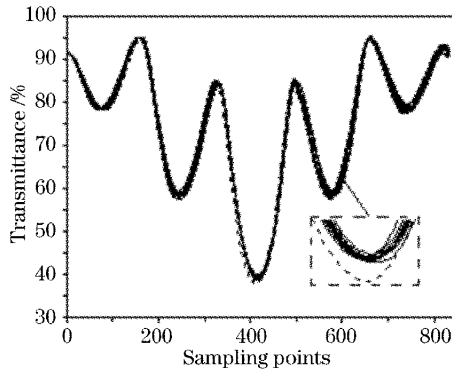


图 2 监控曲线模拟

Fig. 2 Simulation of monitoring curve

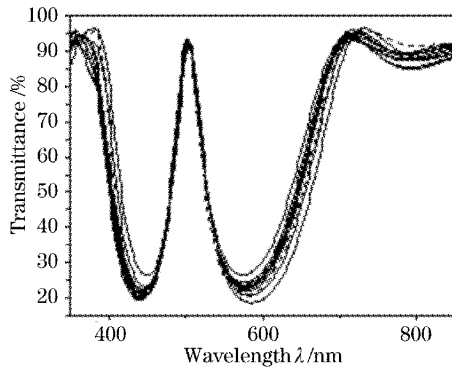


图 3 光谱曲线模拟

Fig. 3 Simulation of spectra

3 监控片不均匀性影响分析

在镀膜过程中,当监控片不随夹具转动时,监控片的不均匀性也将导致实际监控曲线与理论监控曲线的偏离。用面源来描述电子束蒸发源的特性,如图 4 所示。监控片不旋转, r 为监控片的半径, ρ 为监控片上某点离监控片中心的距离, h 为监控片到蒸发源平面的距离, x 为左右蒸发源的中心距离, y 为监控片离两蒸发源中点的水平距离, R_1 为左蒸发源半径, R_2 为右蒸发源半径, l 为监控片上点到蒸发源的距离。从图可知, $\phi = \theta$,监控片上各点的膜厚分别为 $t_s = mh^2 / (\pi\mu l^2)$,其中 μ 为膜料密度, m 为蒸发材料总质量^[8]。

以膜系 G/HLHLHHLHLH/A 为例计算监控

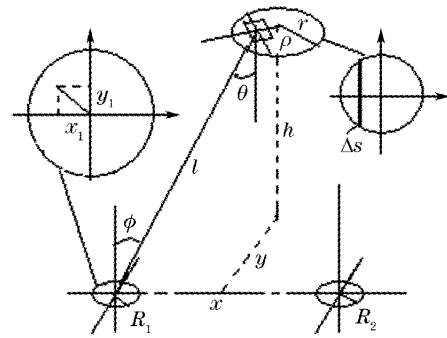


图 4 坩埚及监控片位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of position of crucible and witness glass

片不均匀性对光学监控的影响。设低折射率置于左坩埚内,高折射率材料置于右坩埚内。用计算机产生(-1,1)之间均匀分布的随机值 v_1 和 v_2 ,用 $x_1 = v_1 R_1$, $y_1 = v_2 R_1 (1 - v_1)^{1/2}$ 作为蒸发面源离坩埚中心的距离,则监控片任一点离左坩埚蒸发源的距离为

$$l = [(x/2 + x_1)^2 + (y + y_1)^2 + h^2]^{1/2},$$

同理可得监控片任一点离右坩埚蒸发源的距离,从而计算监控片上各点的膜厚分布,再通过膜系特征矩阵可计算出监控片上各点的透射率,如图 5 所示。

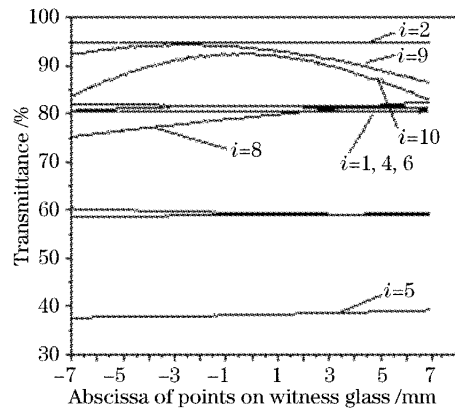


图 5 监控片上透射率分布曲线

Fig. 5 Transmittance curve on witness glass

设 $x = 580$ mm, $y = 150$ mm, $r = 7$ mm, $R_1 = 15$ mm, $h = 572$ mm, $R_2 = 19$ mm,图 5 中,横坐标为 ΔS 区域的横坐标值,纵坐标为 ΔS 区域内每层的平均透射率,其中 i 表示膜层序数。图 6 中,实线为未考虑膜厚监控误差和监控片不均匀性时的理论监控曲线,虚线为考虑膜厚监控误差和监控片不均匀性后的理论监控曲线。

由图 5、图 6 中曲线比较可以看出,随着膜层层数的增加监控片不均匀性逐渐增大。且监控片不均匀性对监控曲线有较大的影响。

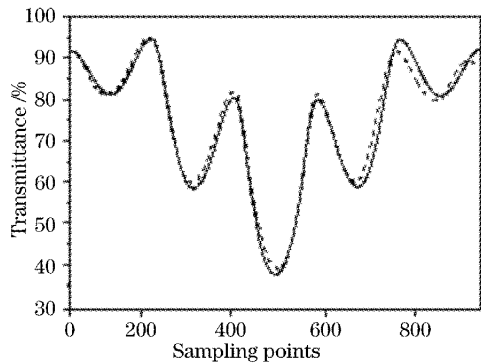


图 6 膜厚监控误差及监控片不均匀性对光学监控的影响
Fig. 6 Effect of thickness monitoring error and inhomogeneity of witness glass on optical monitoring

4 实验制备与分析

用 ZZSX-800 镀制上述膜系。本底真空为 2×10^{-3} Pa, 蒸发真空为 2×10^{-2} Pa, 充氧量为 $16.2 \text{ cm}^3/\text{s}$, 烘烤温度为 $250 \text{ }^\circ\text{C}$, 烘烤时间为 2.5 h, L 层沉积速率为 $(5 \sim 6) \times 10^{-4} \text{ nm/s}$, H 层沉积速率为 $3 \times 10^{-4} \text{ nm/s}$ 。将镀膜过程中实测的监控曲线 C, 未考虑膜厚监控误差、监控片不均匀性时的理论监控曲线 A, 及考虑膜厚监控误差、监控片不均匀性后的理论监控曲线 B 对比, 如图 7 所示。

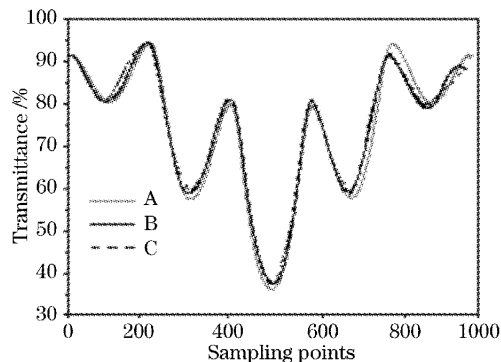


图 7 实测监控曲线与理论监控曲线的比较
Fig. 7 Comparison between experimental monitoring curve and theoretical ones

从图 2、图 6、图 7 可以看出, 考虑膜厚监控误差和监控片不均匀性后的理论监控曲线与实测的监控曲线最为吻合, 该结果可用于光学膜厚自动监控系统中, 能更准确地进行极值预测和监控。鉴于该预测监控曲线与实际监控曲线比较吻合, 该分析方法可用于非规整膜系自动监控的停镀点模拟。

5 实际监控曲线模拟的流程图

膜系计算是一个比较复杂和烦琐的过程, 包括了

复数运算和矩阵运算等数学过程。对其求导也是一个非常复杂的过程。采取膜厚搜索的方法获取包含误差后的膜层厚度, 然后综合监控片不均匀性分析确定最终的监控曲线。程序流程图如图 8 所示。首先根据输入的膜系参量计算当前计算层的理论透过率值, 再给理论值加上过正控制量和随机控制误差, 即可得到考虑误差后停镀点的透过率; 根据停镀点的透过率由计算机用搜索膜厚的方式搜索该层实际的光学膜厚值 D' , 并根据已经镀制的膜层光学厚度计算下一层极值点出现时的膜层光学厚度; 接着根据预先设置的镀膜机的结构参量计算监控片上各点的透过率值(膜层的光学厚度从 0 增加至 D'), 并对得到的透过率值求积分取平均值, 即可得该膜层的监控曲线, 依次类推, 可得到整个膜系的监控曲线。

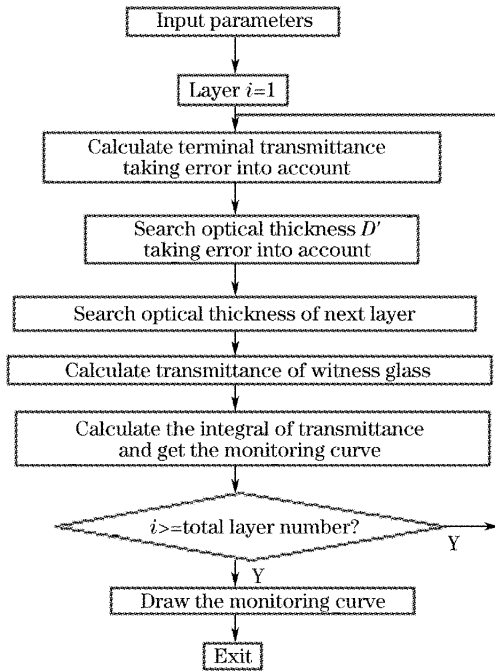


图 8 监控曲线计算流程图

Fig. 8 Flow chart of calculation of monitoring curves

6 结 论

引起光学监控实际监控曲线和理论监控曲线偏离的原因有很多, 本文分析了规整膜系膜厚监控随机误差以及监控片的不均匀性对光学监控的影响, 并使用 VC++ 编写了程序来模拟考虑膜厚监控误差和监控片不均匀性后的实际监控曲线。实验结果表明, 利用本文所设计的程序计算出的理论监控曲线, 即包含膜厚监控误差和监控片不均匀性分析的理论监控曲线和实际监控曲线比较接近, 分析结果可以用来提高规整膜系自动控制极值预测的准确性, 并对非规整膜

系自动控制的停镀点预测具有指导意义。

参 考 文 献

1 Wang Hongchang, Wang Zhanshan, Qin Shuji *et al.*. Analysis of the reflectivity of Mo/Si multiplayer film for soft X-ray[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1362~1365 (in Chinese)
王洪昌,王占山,秦树基等. 软 X 射线 Mo/Si 多层膜反射率拟合分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1362~1365

2 Gu Peifu, Chen Weibin, Liu xu. Design of depolarization thin film cutoff filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 274~278 (in Chinese)
顾培夫,陈卫斌,刘旭. 薄膜截止滤光片的消偏振设计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 274~278

3 Gu Peifu, Lu Wei, Chen Haixing *et al.*. Effect of spectral width of thickness-monitoring system on performance of narrow-band filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 251~254 (in Chinese)
顾培夫,陆巍,陈海星等. 膜厚监控系统的宽度对窄带滤光片

性能的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 251~254

4 H. A. Macleod. *Thin-Film Optical Filters* [M]. London: Institute of Physics Publishing,1999. 40~45

5 Lin Yuxiang. *Research of In-Situ Monitoring System of Optical Thin Film and Reverse* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. 34~35 (in Chinese)
林雨翔. 光学薄膜厚度实时监控系统及其反演的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. 34~35

6 Gu Peifu. *Coating Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press,1990. 175~177 (in Chinese)
顾培夫. 薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 175~177

7 A. Zöller, R. Götzelmann, K. Matel *et al.*. Temperature-stable bandpass filters deposited with ion-assisted deposition[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5609~5612

8 Gu Peifu. *Coating Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press,1990. 159~161 (in Chinese)
顾培夫. 薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社,1990. 159~161



(上接封四)

3.7 参考文献 参考文献应是公开出版物,以便审者、编者、读者查证。文后参考文献以 GB/T 7714-1987 顺序编码制列出,每条内容应包括:作者(或译者,论文集编者,多于 3 人者用等或 et al.),文题,期刊名(或书名,会议名),出版年、卷、期(书或会议文集应相应列出版次、出版地、出版者、出版年、会议地点时间),起止页码。专利需列出专利性质及专利号。引用的网上出版物必须是固定的、可一直查阅的文献。中文参考文献应分别用中英文写出所有项目,并都须加上参考文献类型的标识:

参考文献类型	期刊	专著	论文集	学位论文	标准	专利	报告	报纸
文献类型标识	J	M	C	D	S	P	R	B

具体格式实例如下:

- (1) 期刊:
Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003,**23**(12):1424~1428 (in Chinese)
张娟,刘立人,周煜等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. *光学学报*, 2003,**23**(12):1424~1428
- (2) 专著:
Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology*[M]. Beijing: Science Press,1998,162~165 (in Chinese)
金国藩,李景镇. 激光测量学[M]. 北京:科学出版社,1998. 162~165
- (3) 译著:
Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press,1978. 182~190 (in Chinese)
玻恩,沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京:科学出版社, 1978. 182~190
- (4) 学位论文:
Zhang Jing. *LD Sensor for Weak Vibration Measurement and its Application in Muscle Vibration Measurement* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2000,21~30 (in Chinese)
张景. 激光二极管微振动传感器及其在肌肉振颤测量中的应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2000. 21~30
- (5) 技术标准:
National Standardization Technical Committee. GB 3100~3102-93. *Quantities and Units* GB3100~3102-93[S]. Beijing: China Standard Press,1994

国家标准化技术委员会. 量和单位 GB3100~3102-93[S]. 北京:中国标准出版社, 1994

为了避免漏引,并扩大您的论文及《光学学报》、《中国激光》、《Chinese Optics Letters》等中国光学类期刊的国际、国内影响,希望增引您自己和同行近二年在《光学学报》、《中国激光》、《Chinese Optics Letters》等中国光学类期刊上发表的文章作为参考文献。

3.8 基金项目: 所投文章项目受到资助的,应标明资助名称及批准号。

作者简介: 姓名(出生年~),性别,民族(汉族可省),籍贯,职称,学历,从事专业。E-mail(少于 60 字)

3.9 投寄要求 为了加速期刊的电子化、网络化,加快稿件处理速度,一律采用 E-mail 投稿。稿件需附一份显示来稿创新点的说明(附在文章后,100~300 字);请不要交寄个人,以免延误稿件的受理时间。本刊收到稿件后在 2~3 个工作日内 E-mail 发出收稿通知告知其他事项。稿件录用后,须请提供文章修改定稿后的电子版(包括图)。

3.10 本刊现已进入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《中国光学期刊网》等,不再另行通知作者,对版权有特殊要求者,请事先声明。

4 审稿程序 稿件收到评审费后分送两位同行评议、主编终审、择优录用;编辑部自收稿日起 4 个月内将初审意见函告作者,逾期,作者可另行处理原稿,但需告知编辑部。

5 版权转让 在审稿通过后,作者须转让著作权人作品著作权(包括各种介质、媒体的版权)给编辑部,并把全部作者签名附单位盖章的版权转让函。

6 录用与否 录用稿作者应遵照中国科协有关文件精神,支付适量版面费以聊补期刊的高额亏损。由于近年来自来稿量猛增,为了缩短发表周期,请作者精炼文章内容,更不要加附录,否则,超过 4 页的文章将加收版面费。编辑部有权对录用稿件作编辑意义的增删加工。录用稿一经本刊刊登,本刊享有版权,并向作者酌付稿酬,寄送该期期刊一册和抽印本 10 份。

7 投稿及回复时,请告知作者的有效联系方式 除“姓名、通讯地址、邮政编码”外,E-mail、电话(办公室及家庭或宿舍)、手机等是必不可少的。并用 E-mail 回复修改意见和修改稿(修改部分请划线)。最好注明通讯作者(作者单位相对稳定)。

8 请推荐 3~5 位同行专家(包括海外华人研究人员)作候选审稿人 (给出他们从事研究的学科和课题,通讯地址和 E-mail)。