

文章编号: 0258-7025(2009)02-0439-05

金属反射镜对外差干涉椭偏测量精度的影响

邓元龙^{1,2} 李岳峙¹ 吴玉斌¹ 徐 刚^{1,2}

(¹ 深圳大学机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060; ² 深圳市模具先进制造技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 采用声光调制器设计了一种透射式外差干涉椭偏测量系统。实验测量了单层透明氧化锡(ITO)膜,膜厚和折射率测量误差分别达 8nm 和 7%。采用琼斯矢量法分析了金属反射镜引起的光束椭圆化对测量结果的影响。从光学系统中移出被测样品得到的标定数据,可以消除金属反射镜本身退偏效应的影响,但无法消除退偏效应和方位角误差共同作用所引入的椭偏参数测量误差。计算结果表明,退偏效应和方位角误差共同作用引入的膜厚测量误差可达 4 nm 左右,该误差与薄膜参数无关,与方位角误差近似成线性关系。

关键词 测量;干涉式椭偏术;误差分析;金属反射镜;退偏效应;方位角误差

中图分类号 TH744.3;TH89 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0439

Influence of Metal-Coated Mirrors on Measurement Accuracy in Heterodyne Interferometric Ellipsometry

Deng Yuanlong^{1,2} Li Yuezhi¹ Wu Yubin¹ Xu Gang^{1,2}

(¹ College of Mechatronics & Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)
(² Shenzhen Key Laboratory of Advanced Die-Manufacturing Technology, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract A transmission ellipsometer with the configuration of heterodyne interferometer and two acousto-optical modulators was investigated. A single layer of indium tin oxide on a glass substrate was measured, and the measurement errors of the sample thickness and refractive index range up to 8 nm and 7%, respectively. The influence of the elliptic polarization due to metal-coated mirrors on measurement accuracy was analyzed with Jones vector method. The error only produced by the depolarization effect of metal-coated mirrors can be eliminated just by removing the sample out of the configuration. However, the calibration does not work to the error resulted from the misorientation and the depolarization effect. The calculation shows the error of sample thickness measurement is 4 nm, and the error is approximately linear with the orientation error and independent of the film parameters.

Key words measurement; interferometric ellipsometry; error analysis; metal-coated mirrors; depolarization effect; orientation error

1 引 言

纳米量级的薄膜,在微电子、材料和化学工程、光学及激光技术等领域具有广泛的应用,它的折射率和厚度对产品性能有直接的影响。椭圆偏振测量术是目前最重要的薄膜测试工具之一^[1],具有高精度、非接触、可同时测得折射率和厚度且擅长测量极薄膜等优点。目前虽然各种类型的椭偏仪发展很快,且成功应用于在线测量^[2],但测量速度仍不能适应一些快速镀膜过程^[3],例如硬盘磁头飞行高度的在线测量^[4];由于传统椭偏仪存在机械旋转部件,限

制了测量速度的进一步提高,而且导致一些固有的误差难以消除^[5]。与激光外差干涉测量技术相结合是薄膜椭偏测量发展的一个重要方向。H. F. Hazebroek 等^[6]于 1973 年首次提出了干涉式椭偏测量的概念,而 M. M. Wind 等分别提出了使用塞曼激光^[7]和声光调制器^[5]的系统设计,也有采用电光调制^[8]和波长调制半导体激光器^[9]的方案。干涉式椭偏测量技术对于实时、快速薄膜测量有很好的应用价值与市场潜力,但外差干涉测量中存在的非线性误差是其获得实际应用的主要障碍。外差干涉

收稿日期:2008-02-25;收到修改稿日期:2008-05-15

基金项目:深圳科技计划项目(200721)资助课题。

作者简介:邓元龙(1971—),男,博士,副教授,主要从事纳米测量技术、智能控制算法方面的研究。

E-mail: dengyL@szu.edu.cn

测量系统中的误差分析一直是国内外研究热点^[10~20],但都集中于采用迈克耳孙式干涉仪结构的动态位移测量系统。

本文采用声光调制器设计了一种透射式外差干涉椭圆偏测量系统,实验测量了单层透明氧化铟锡(ITO)膜,并采用琼斯矢量法研究了金属反射镜的退偏效应和方位角误差对测量结果的影响。

2 实验系统

实验装置如图 1 所示,Uniphase 公司生产的 1107P He-Ne 激光管输出 0.8 mW 左右的线偏振光,波长为 632.8 nm。旋转激光管角度,使光束偏振方向与 x 轴成 45° ,经过半分光镜(BS1)产生两路等强度的测量光束和参考光束。采用美国 IntraAction 公司的 DFE-A4 双频驱动器和声光调制器(AOM)-40 模块,锁定测量光和参考光的一级衍射频差为 200 kHz,光阑用来阻挡未衍射零级光。测量光束中近似等强度的 p, s 分量以 70° 入射被测薄膜样品,幅值和相位分别受到不同调制。在半分光镜 BS2 处测量和参考光束中的 p, s 分量分别相应干涉,由偏振分光镜(PBS)分成两路外差光强信号。

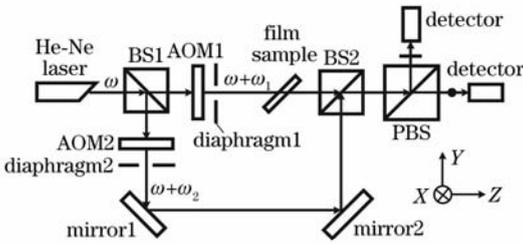


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic of the heterodyne interferometric ellipsometry

采用琼斯矢量法,入射到分光镜 BS1 的场强信号为

$$E = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \exp[i(\omega t + \alpha)], \quad (1)$$

式中 ω 为角频率, α 为初相位。系统的琼斯响应为

$$\begin{aligned} E_p &= \mathbf{P}_R(\mathbf{B}_T \mathbf{S}_T \mathbf{B}_T E_m + \mathbf{B}_R \mathbf{M} \mathbf{M} \mathbf{B}_R E_r), \\ E_s &= \mathbf{P}_T(\mathbf{B}_T \mathbf{S}_T \mathbf{B}_T E_m + \mathbf{B}_R \mathbf{M} \mathbf{M} \mathbf{B}_R E_r), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 E_p, E_s 分别为光电管接收到的 p, s 分量场强信号, E_m, E_r 分别为测量光和参考光的场强信号

$$\begin{aligned} E_m &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \exp\{i[(\omega + \omega_1)t + \alpha_1]\}, \\ E_r &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \exp\{i[(\omega + \omega_2)t + \alpha_2]\}, \end{aligned} \quad (3)$$

$\omega_1, \omega_2, \alpha_1, \alpha_2$ 分别为测量光和参考光的角频率和初相位,下标 R 和 T 分别代表反射和透射; $\mathbf{P}, \mathbf{B}, \mathbf{M}$ 和 \mathbf{S} 分别为偏振分光镜、半反镜、反射镜和薄膜样品的琼斯矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_R &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_T = \begin{pmatrix} t_s & 0 \\ 0 & t_p \end{pmatrix}, \\ \mathbf{B}_R &= \mathbf{B}_T = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

t_p, t_s 分别为薄膜对 p, s 分量的透射系数。把(3),(4)式代入(2)式可得

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{1}{4} t_s \exp\{i[(\omega + \omega_1)t + \alpha_1]\} + \\ &\quad \frac{1}{4} \exp\{i[(\omega + \omega_2)t + \alpha_2]\}, \\ E_p &= \frac{1}{4} t_p \exp\{i[(\omega + \omega_1)t + \alpha_1]\} + \\ &\quad \frac{1}{4} \exp\{i[(\omega + \omega_2)t + \alpha_2]\}, \end{aligned} \quad (5)$$

忽略不影响讨论的常系数,可得归一化的 p, s 分量光强信号分别为

$$\begin{aligned} I_s &\propto |t_s| \cos(\Delta\omega t + \phi_s + \Delta\alpha), \\ I_p &\propto |t_p| \cos(\Delta\omega t + \phi_p + \Delta\alpha), \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ 为初相位差, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ 为拍频, ϕ_p, ϕ_s 分别为薄膜对透射 p, s 分量的相位调制量。因此,从(6)式可得到所需的椭圆偏参数对 $(\tan(\psi), \Delta)$

$$\Delta = \phi_p - \phi_s, \tan(\psi) = |\rho| = |t_p| / |t_s|, \quad (7)$$

把(7)式代入透射椭圆偏测量基本方程^[1],从而数值反演出薄膜厚度和折射率。理论上图 1 所示的马赫曾德尔(Mach-Zehnder)型干涉仪由于完全对称,具有较强的抗环境干扰能力,即(6)式中的 $\Delta\alpha$ 不影响测量结果。

标准薄膜样品为 BK7 玻璃上的单层透明 ITO 膜,薄膜折射率 $n_1 = 2.0$, 厚度 $d = 35$ nm。由于外差干涉仪非线性误差的影响,椭圆偏参数测量数据存在较大的波动,膜厚和折射率测量误差分别达到 8 nm 和 7%。

3 金属反射镜引入的误差

如图 2 所示,一个非理想金属反射镜法线方向与入射面不重合,即方位角误差为 β 。在 $X'Y'$ 坐标系中,金属平面反射镜的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} -r_s \exp(i\tau_s) & 0 \\ 0 & r_p \exp(i\tau_p) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中 r_p, r_s, τ_p, τ_s 分别为金属反射镜 p, s 分量的幅值

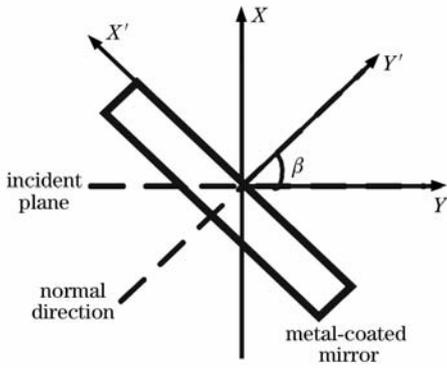


图2 非理想金属反射镜方位角误差

Fig. 2 Misorientation of non-ideal metal-coated mirror

反射系数和相位跳变。为了简化分析,忽略不影响讨论的公共系数,(8)式可以转换为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \eta \exp(i\tau) & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中

$$\eta = r_s/r_p, \quad \tau = \tau_s - \tau_p, \quad (10)$$

在 XYZ 坐标中,金属反射镜的琼斯矩阵可以由(9)式变换得到

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \eta \cos \beta \exp(i\tau) & \sin \beta \\ \eta \sin \beta \exp(i\tau) & -\cos \beta \end{pmatrix}, \quad (11)$$

为了简化分析过程,假设图 1 中的两个金属反射镜相同且方位角误差也一样。把(11)式代入(2)式可得场强分量为

$$\begin{aligned} E_s &\propto t_s \exp\{i[(\omega + \omega_1)t + \alpha_1]\} + \\ &\quad a \exp(i\varphi_a) \exp\{i[(\omega + \omega_2)t + \alpha_2]\}, \\ E_p &\propto t_p \exp\{i[(\omega + \omega_1)t + \alpha_1]\} + \\ &\quad b \exp(i\varphi_b) \exp\{i[(\omega + \omega_2)t + \alpha_2]\}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $a, b, \varphi_a, \varphi_b$ 分别为合成场强 p, s 分量的幅值和相位误差因子,

$$\begin{aligned} a \exp(i\varphi_a) &= \eta^2 \cos^2 \beta \exp(i2\tau) + \\ &\quad \frac{1}{2} \eta \sin 2\beta \exp(i\tau) + \\ &\quad \eta \sin^2 \beta \exp(i\tau) - \frac{1}{2} \sin 2\beta, \\ b \exp(i\varphi_b) &= \frac{1}{2} \eta^2 \sin 2\beta \exp(i2\tau) + \\ &\quad \eta \sin^2 \beta \exp(i\tau) - \\ &\quad \frac{1}{2} \eta \sin 2\beta \exp(i\tau) + \cos^2 \beta, \end{aligned} \quad (13)$$

由(12)式可得归一化的光强信号

$$\begin{aligned} I_s &\propto |t_s| a \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \phi_s - \varphi_a), \\ I_p &\propto |t_p| b \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \phi_p - \varphi_b), \end{aligned} \quad (14)$$

与(6),(7)式对比,可见金属反射镜引入了明显的椭

偏参数测量误差。

4 分析与讨论

假设在测量前,经过仔细调整反射镜使得图 2 中的 $\beta = 0$,则(14)式简化为

$$\begin{aligned} I_s &\propto |t_s| \eta^2 \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \phi_s - 2\tau), \\ I_p &\propto |t_p| \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \phi_p), \end{aligned} \quad (15)$$

此时,如果把薄膜样品移出实验系统进行标定,可以直接得到标定光强信号

$$\begin{aligned} I_s^c &\propto \eta^2 \cos[\Delta\omega t + \Delta\alpha - 2\tau], \\ I_p^c &\propto \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha), \end{aligned} \quad (16)$$

比较(15),(16)式的幅值和相位,可得到与(7)式一样的椭偏参数对。因此,如果仅考虑其退偏效应而不存在方位角误差,则金属反射镜并不影响系统测量精度。但由于环境参数的变化,特别是在非恒温、干扰较大的现场测量情况下,光学元器件及其支架必然产生一定的变形,从而导致方位角不匹配^[20]。此时,根据(7),(14)和(16)式可得椭偏参数误差表达式

$$\frac{\delta|\rho|}{|\rho|} = \eta^2 \frac{b}{a} - 1, \quad \delta\Delta = \varphi_a - \varphi_b - 2\tau. \quad (17)$$

根据文献[21]的折射率数据,表 1 计算了常用镀膜金属的反射系数。

表 1 镀膜金属的 p, s 分量反射系数 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)Table 1 Reflective index of p and s components for Au, Ag, Cu and Al ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)

	Reflective index	r_p	r_s	$\tau_p / (^\circ)$	$\tau_s / (^\circ)$
Au	0.07-j4.05	0.9889	0.9944	-39.03	-19.51
Ag	0.20-j3.32	0.9551	0.9773	-46.93	-23.46
Cu	0.14-j3.45	0.9704	0.9851	-45.35	-22.67
Al	1.15-j6.39	0.9277	0.9632	-24.36	-12.18

把表 1 的数据代入(17)式并取反射镜方位角 $\beta = 1^\circ$,可计算出椭偏参数误差如表 2 所示。相对而言,镀铝反射镜引入的椭偏参数误差较小,尤其是其相位差误差。将 $\delta|\rho|/|\rho| = -1.92\%$, $\delta\Delta = 0.39^\circ$ 代入(7)式计算可知,引入约 4 nm 的膜厚测量误差。从表 1 中得到铝的 η 和 τ ,并和(13)式一起代入(17)式,可得铝反射镜引入的椭偏参数测量误差随反射镜方位角 β 的变化规律,如图 3 所示。

由于金属反射镜均位于参考光路中,对测量光束没有影响,所以由此引入的椭偏参数测量误差应该与薄膜参数无关。如果只考虑金属反射镜的退偏和方位角误差影响,以上计算结果((13),(17)式和

图3)与此相一致。当 β 很小时,(13)式中的 $\sin \beta \approx \beta$, $\cos \beta \approx (\cos \beta)^2 \approx 1$, $(\sin \beta)^2 \approx 0$,所以该误差与反射镜方位角 β 近似成线性关系,也与图3相一致。

表2 常用金属反射镜引入的椭圆参数误差

Table 2 Error of ellipsometric parameters resulted from metal-coated mirrors

	Au	Ag	Cu	Al
$(\delta \rho / \rho)/\%$	-1.93	-2.04	-2.01	-1.92
$\delta\Delta/(\circ)$	0.61	0.70	0.69	0.39

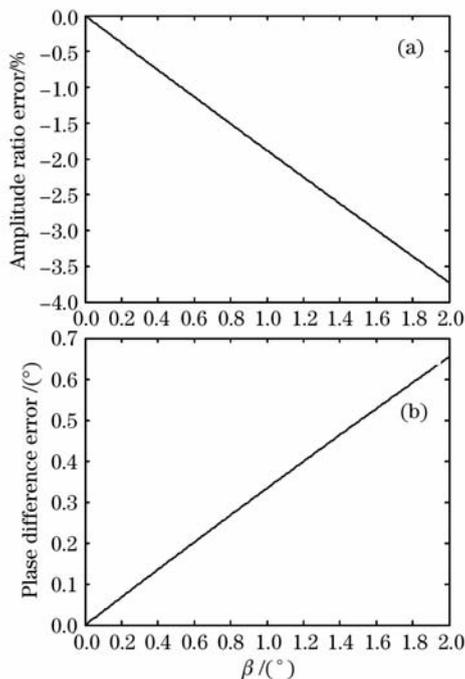


图3 椭圆参数测量误差随反射镜方位角的变化规律

(a) 幅值比误差; (b) 相位差误差

Fig. 3 Ellipsometric parameter error versus misorientation of metal-coated mirrors. (a) amplitude ratio error; (b) phase difference error

5 结 论

分析了一种采用声光调制器的透射式外差干涉椭圆测量系统,光学系统完全对称且没有任何机械旋转部件,与传统椭圆仪相比,更适用于干扰环境中的实时、在线测量。结果表明,金属反射镜退偏效应和方位角失配共同作用引入的膜厚测量误差可达4 nm左右,此误差不能通过标定的方法来消除;如果不存在方位角失配,金属反射镜本身的退偏效应对测量没有影响,所以反射镜的安装定位精度非常重要。

参 考 文 献

1 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light [M]. Beijing: Science Press, 1986

R. M. A. 阿查姆, N. M. 巴夏拉. 椭圆偏振测量术和偏振光 [M]. 北京: 科学出版社, 1986

2 Sun Zhaoqi, Cao Chunbin, Song Xueping *et al.*. Study on ellipsometric spectra of ITO film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):403~408

孙兆奇, 曹春斌, 宋学萍 等. 氧化铟锡薄膜的椭圆光谱研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(2):403~408

3 K. Hemmes, M. A. Hamsra, K. R. Koops *et al.*. Evaluation of interferometric ellipsometer systems with a time resolution of one microsecond and faster [J]. *Thin Solid Films*, 1998, **313-314**:40~46

4 Yue Zhaoyang, Lin Dejiao, Song Nanhai *et al.*. In-situ measurement for flying height modulation of magnetic head by symmetrical common-path heterodyne interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):841~845

岳兆阳, 林德教, 宋南海 等. 对称共路外差干涉法测量硬盘磁头飞行高度瞬态调制[J]. 中国激光, 2007, **34**(6):841~845

5 Chin-Hua Lin, Chien Chou, Keh-Su Chang. Real time interferometric ellipsometry with optical heterodyne and phase lock-in techniques [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34):5159~5162

6 H. F. Hazebroek, A. A. Holscher. Interferometric ellipsometry [J]. *J. Phys. E*, 1973, **6**:822~826

7 M. M. Wind, K. Hemmes. New ultra-fast interferometric ellipsometry system based on Zeeman two-frequency laser [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1994, **5**:37~46

8 Ming-Horng Chiu, Ju-Yi Lee, Der-Chin Su. Complex refractive-index measurement based on Fresnel's equations and the uses of heterodyne interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(19):4047~4052

9 Lionel R. Watkins, Maarten D. Hoogerland. Interferometric ellipsometer with wavelength-modulated laser diode source [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(22):4362~4366

10 Chien-Ming Wu, Ching-Shen Su. Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**:62~68

11 Wenmei Hou, Gunter Wilkening. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers [J]. *Precision Engineering*, 1992, **14**(2):91~98

12 Jolyon M. De Freitas. Analysis of laser source birefringence and dichroism on nonlinearity in heterodyne interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**:1356~1359

13 J. M. De Freitas. Phase nonlinearity extrema in Zeeman heterodyne interferometry [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(2):572~575

14 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Method to reduce first harmonic nonlinearity in laser heterodyne interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1027~1030

陈洪芳, 丁雪梅, 钟志 等. 减小外差干涉一次谐波非线性误差的方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(6):1027~1030

15 Chunyong Yin, Gaoliang Dai, Zhixia Chao *et al.*. Determining the residual nonlinearity of a high-precision heterodyne interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(8):1361~1365

16 Huijie Zhao, Guangjun Zhang. Nonlinear error by orientation and elliptic polarization in a two-beam interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(12):3204~3208

17 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi. Effect of nonlinearity by the nonideal splitting performance of polarization beam splitter in laser heterodyne interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1562~1566

陈洪芳, 丁雪梅, 钟志. 偏振分光镜分光性能非理想对激光外差干涉非线性误差的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(11):1562~1566

18 Hou Wenmei, Wang Jun. Subdivision and elimination of nonlinearity in heterodyne interferometers [J]. *Acta*

Metrologica Sinica, 2007, **28**(3):210~215

侯文玫,王 俊. 外差激光干涉仪非线性的细分和消除[J]. 计量学报, 2007, **28**(3):210~215

- 19 Ning Zhigao, Cheng Zhaogu, Gao Haijun. Error analysis of frequency mixing for heterodyne interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):852~854

宁志高,程兆谷,高海军. 外差干涉仪混频误差分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(6):852~854

- 20 Chen Benyong, Mu Ruizhen, Zhou Yanjiang *et al.*. Nonlinear error analysis of laser synthetic-wavelength nanomeasurement interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):240~245

陈本永,穆瑞珍,周砚江等. 激光合成波长纳米测量干涉仪的非线性误差分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(2):240~245

- 21 Li Jingzhen. Handbook of Optics [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1986

李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986

《中国激光》“全固态激光技术”专题征稿启事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,随着全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》计划于2009年6月正刊上推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光二极管抽运固体激光器
- 光纤激光器
- 半导体激光器及相关技术
- 晶体材料及相关技术
- 光学薄膜技术
- 其他

截稿日期:2009年3月31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“全固态激光技术”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见中国光学期刊网: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.shcnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部