

# 双工件台光刻机中的焦面控制技术

李金龙<sup>1,2</sup> 胡 松<sup>1</sup> 赵立新<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 面对可用焦深日益缩短的趋势, 高精度的焦面控制技术显得尤为重要。针对双工件台光刻机中采用的焦面控制技术, 介绍了基于偏振调制的光栅检焦技术及其测量原理, 研究了双工件台光刻机中的调平调焦技术。基于平面拟合、最小二乘法及坐标变换公式推导了曝光狭缝内离焦量计算公式; 研究了一种离焦量解耦算法, 该算法将曝光狭缝内离焦量解耦为调平调焦机构三个压电陶瓷的独立控制量, 并使狭缝曝光场中心在调平调焦运动过程中不发生平移。经仿真分析表明, 该算法可用于调平调焦精度优于 10 nm 的高精度调焦调平系统, 能满足线宽小于 100 nm 投影步进扫描光刻机的需要。

**关键词** 光学器件; 光刻术; 调平调焦; 双工件台光刻机

**中图分类号** TP212.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1223002

## Control Technique of Wafer Surface in Dual-Stage Lithographic System

Li Jinlong<sup>1,2</sup> Hu Song<sup>1</sup> Zhao Lixin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China)  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** With the trend of reduction in depth of focus, the control of wafer surface is becoming more and more important. The control of wafer surface in dual-stage lithography is studied. The focus detection method, which is based on the polarization modulation mechanism of dual-grating moiré fringes and its measurement principle, is introduced; then the focusing and leveling technique in dual-stage lithographic system is studied. The algorithm for defocus in exposure slit is evolved by using least square method, surface fitting with a plane and coordinate translation. The defocus-decoupling algorithm is studied in detail, which converts the defocus to movement of the piezoelectric ceramics (PZT) and prevents the shift for the center of the exposure slit. The algorithm can be used for precision of 10 nm in focusing and leveling by the simulation, which can meet the need of projection step scan lithography machine with line width less than 100 nm.

**Key words** optical devices; photolithography; leveling and focusing; dual-stage lithographic system

**OCIS codes** 120.3940; 050.2770; 120.3930

## 1 引 言

集成电路行业的发展一直遵循着摩尔定律, 即集成度每三年增长 2 倍, 器件的特征尺寸每三年缩小到原值的  $1/2^{[1]}$ 。由瑞利公式可知, 特征尺寸的减小可通过缩短曝光波长和增大数值孔径来实现, 但两者均会导致光刻设备有效焦深的急剧缩短; 而大直径尺寸硅片的采用所带来的平整度、厚度不均

匀性等问题则要求光刻设备具有大焦深, 两者的矛盾只有通过高精度的焦面控制技术(即高精度的检焦及高精度的调平调焦)来解决。

作为微电子产业的核心设备, 光刻机在摩尔定律的推动下经历了接近、接触式光刻机、步进重复投影光刻机和步进扫描光刻机的发展历程, 目前已进入双工件台光刻机时代<sup>[2~6]</sup>。双工件台光刻机采用

**收稿日期**: 2012-05-23; **收到修改稿日期**: 2012-07-04

**基金项目**: 国家自然科学基金(61274108)资助课题。

**作者简介**: 李金龙(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事微电子装备方面的研究。E-mail: lijnlong0312@126.com

**导师简介**: 胡 松(1965—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事微电子总体专用设备方面的研究。

E-mail: husong@ioe.ac.cn

不同于传统步进扫描光刻机的焦面控制技术,步进扫描光刻机中采用实时调平调焦技术,即硅片表面高度测量、离焦量( $Z, r_x, r_y$ )计算和实时闭环调平调焦运动等工序与硅片的扫描曝光同时进行,故要求计算离焦量的算法应具有实时性,考虑到调平调焦执行器的响应时间和产率最大化,则要求离焦量计算方法具有快速性。实时性与快速性的要求,使得步进扫描光刻机中的离焦量算法只能利用各测量点之间的简单几何关系完成离焦量( $Z, r_x, r_y$ )的计算,因此其离焦量计算精度不高。此外,步进扫描光刻机中的实时调平调焦技术通过计算某一时刻  $t$  的离焦量完成当前狭缝曝光场的调平调焦,经过时间间隔  $\Delta t$  后,再次计算  $t + \Delta t$  时刻的离焦量并完成调平调焦,即硅片的实时调平调焦其实是不连续的、离散的。若硅片表面有较大的起伏则可能引起调平调焦执行器的大行程、高速运动,不仅影响调平调焦精度,还会造成整个方镜的振动进而影响曝光质量。而双工件台光刻机采用离线焦面控制技术,即在双工件台光刻机中的测量位置完成整个硅片三维形貌的测量,然后离线计算各曝光场的离焦量,当工件台转换到曝光位置时仅需完成硅片与掩模的对准就可

以完成硅片的扫描曝光。

## 2 双工件台光刻机中的离线焦面控制技术

### 2.1 双工件台光刻机中的光栅检焦技术

常用的检焦技术包括光度检焦技术、激光干涉检焦技术、光栅检焦技术、气动检焦技术和电容检焦技术<sup>[7]</sup>。其中基于偏振调制的光栅检焦技术以其工艺适应性强、检焦精度高而在国际高端光刻机中获得了广泛的应用。

#### 2.1.1 光栅检焦系统

光栅检焦系统的光路部分主要分为 4 个部分<sup>[8]</sup>:照明系统 S、远心成像系统 1(L1 和 L2)、远心成像系统 2(L3 和 L4)、探测光学系统。由照明系统发出的平行光投射到物光栅 G1 表面,透射光携带物光栅信息经远心成像系统 1 成像在待测硅片表面,反射光经远心成像系统 2 会聚后,照明与物光栅同周期的检测光栅 G2,检测光栅的透射光经偏振调制后成像在光电探测器上,整个检焦方案光路图如图 1 所示。

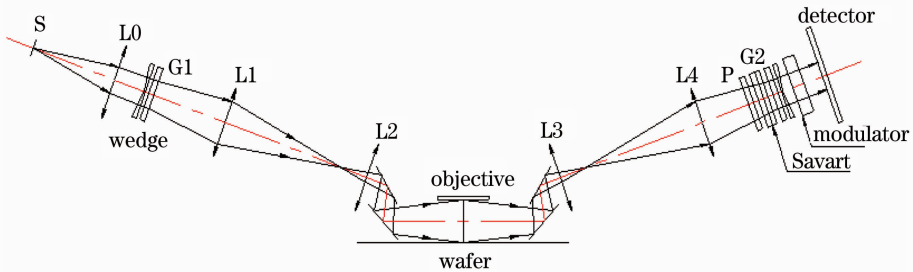


图 1 基于偏振调制的光栅检焦光路示意图

Fig. 1 Optical schematic of grating focus detection based on polarization modulation

#### 2.1.2 光栅检焦测量模型

测量光通过大入射角照射到硅片表面,检测反射光斑在光电探测器上的位置获得硅片表面的位置信息,其基本测量原理是采用三角测量原理,如图 2 所示。硅片表面位置偏移  $\Delta Z$  直接反应到探测系统获得的光斑位置变化量  $\Delta L_1$  上,两者间几何关系表示为

$$\Delta L_1 = 2\Delta Z \sin \theta, \quad (1)$$

式中  $\theta$  为测量光入射角度。通过检测  $\Delta L_1$  即可获得硅片表面高度  $Z$ 。

## 2.2 双工件台光刻机中的调平调焦技术

双工件台光刻机在测量位置利用多个调平传感器测量点形成探测线阵,通过工件台沿预定路径扫描完成整个硅片三维形貌的测量,然后离线计算各曝光

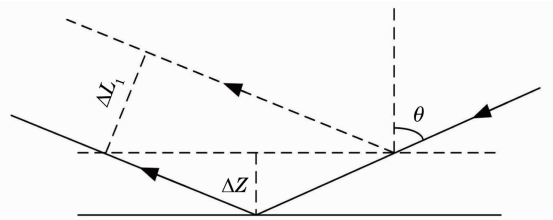


图 2 光栅检焦测量模型

场的离焦量,当工件台转换到曝光位置时仅需完成硅片与掩模的对准就可以完成硅片的扫描曝光。

#### 2.2.1 曝光狭缝内离焦量计算

硅片曝光场及狭缝曝光场如图 3 所示。

设曝光狭缝内多个测量点的坐标分别为  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,对曝光狭缝内硅片表面进行平面拟合,拟合

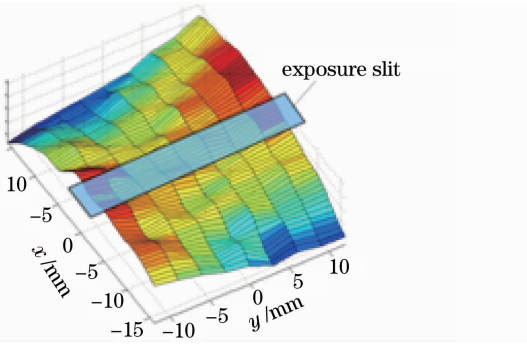


图3 硅片和狭缝曝光场

Fig. 3 Silicon wafer and slit exposure field

出的平面方程为<sup>[9]</sup>

$$Z = aX + bY + c. \quad (2)$$

该平面的单位法向量  $\mathbf{n}$  为  $(\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2+1}}, \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2+1}}, \frac{-1}{\sqrt{a^2+b^2+1}})$ 。记  $E_i = (aX_i + bY_i + c) - Z_i$  为拟合平面上点  $(X_i, Y_i)$  处拟合值与实际值  $Z_i$  的偏差, 通过最小二乘法使  $\sum E_i^2$  最小, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum E_i^2}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial \sum E_i^2}{\partial b} = 0, \\ \frac{\partial \sum E_i^2}{\partial c} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

可解得  $a, b, c$  的值。

设曝光狭缝内离焦量为  $(Z, r_x, r_y)$ , 坐标变换公式为

$$\mathbf{p} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}' + \mathbf{p}_{B_0}, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{p} = [x_p \ y_p \ z_p]^T$ ,  $\mathbf{p}' = [x'_p \ y'_p \ z'_p]^T$  分别为点  $P$  在坐标系  $xoy$  和  $x'o'y'$  中的位置矢量;  $\mathbf{p}_{B_0} = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$  为坐标系  $x'o'y'$  的坐标原点在坐标系  $xoy$  中的位置矢量;  $\mathbf{R}$  为绕坐标系  $xoy$  的旋转矩阵。根据(4)式  $B$  拟合平面的单位法向量  $\mathbf{n}$  可得

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r_x & -\sin r_x \\ 0 & \sin r_x & \cos r_x \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos r_y & 0 & \sin r_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin r_y & 0 & \cos r_y \end{bmatrix} \mathbf{n} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由(5)式可得  $r_x, r_y$ ; 若取点  $(X_j, Y_j, Z_j)$  为狭缝曝光场中心点, 则  $Z = aX_j + bY_j + c$ 。至此, 可求得曝光狭缝内离焦量为  $(Z, r_x, r_y)$ 。

针对硅片曝光场和狭缝曝光场各自的尺寸, 对硅片曝光场进行多次平面拟合其各处的离焦量作为后续调平调焦控制的输入。

### 2.2.2 调平调焦解耦运算

由上述狭缝曝光场的离焦量  $(Z, r_x, r_y)$  经调平调焦解耦运算得到 3 个压电陶瓷 (PZT) 驱动器的目标值  $(\Delta Z_A, \Delta Z_B, \Delta Z_C)$ , 再由 3 个压电陶瓷组成的调平调焦执行机构完成狭缝曝光场的调平调焦运动。

传统的 3 点调平中当调整  $A$  点时, 整个硅片表面各点高度均发生变化, 其实质是硅片表面以  $BC$  为轴线转动 (如图 4 所示), 当点  $A$  转至点  $A'$  时, 其水平面内投影  $A''$  已形成  $\Delta L$  的位置平移; 同理采用此种离焦量解耦算法进行调平调焦时, 狭缝曝光场的中心也会因为旋转运动而在水平面内产生平移, 随着硅片尺寸的增大 (450 mm) 和分辨力的不断缩小 (30 nm), 该平移将严重影响套刻精度进而影响曝光质量。

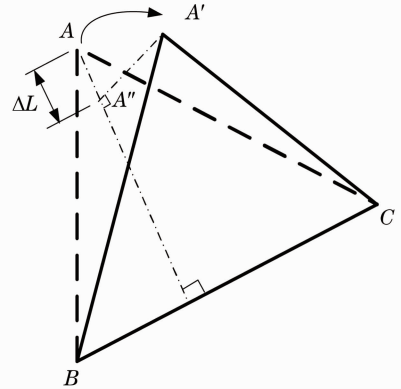


图4 传统三点调平示意图

Fig. 4 Schematic diagram for conventional three-point leveling

现采用一种新的离焦量解耦算法, 该算法在解耦过程中以狭缝曝光场的中心点 (投影物镜光轴与硅片表面交点) 为转动中心进行调平调焦解耦运算, 保证中心点在调平调焦过程中不会发生平移, 避免对套刻精度的影响。图 5 为工件台调平调焦结构示意图, 硅片中心与 3 个压电陶瓷  $A, B, C$  所组成的等边三角形的内心重合, 以等边三角形内心为原点建立直角坐标系。设等边三角形的边长为  $2e$ , 则压电陶瓷  $A$  的坐标为  $(-\frac{\sqrt{3}}{3}e, e)$ ,  $B$  为  $(-\frac{\sqrt{3}}{3}e, -e)$ ,  $C$  为  $(\frac{2\sqrt{3}}{3}e, 0)$ 。取图中狭缝曝光场中心点  $D(x, y)$ 。

将狭缝曝光场的调平调焦运动分解为绕  $X$  轴的旋转运动, 绕  $Y$  轴的旋转运动,  $Z$  向调焦运动 3 个

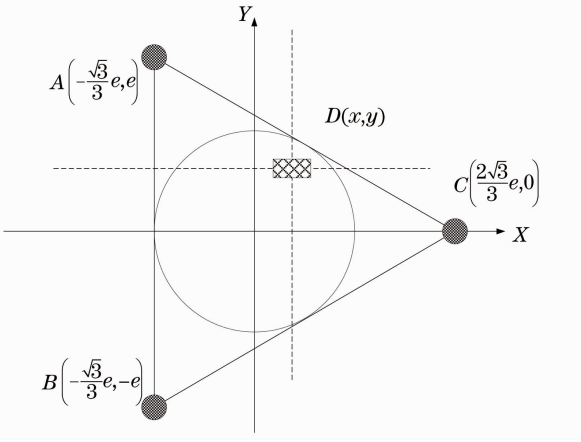


图 5 工件台调平调焦结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram for leveling and focusing in wafer stage

关键步骤。当完成绕 X 轴的旋转运动时,各个压电陶瓷的 Z 向位移量分别为  $\Delta Z'_A, \Delta Z'_B, \Delta Z'_C$ :

$$\begin{cases} \frac{\Delta Z'_A}{\Delta Z'_C} = \frac{e-y}{y} \\ \frac{\Delta Z'_A}{\Delta Z'_B} = \frac{e-y}{y+e} \end{cases} \quad (6)$$

当完成绕 Y 轴的旋转运动时,各个压电陶瓷的 Z 向位移量分别为  $\Delta Z''_A, \Delta Z''_B, \Delta Z''_C$ :

$$\frac{\Delta Z''_C}{\Delta Z''_A} = \frac{\Delta Z''_C}{\Delta Z''_B} = \frac{\frac{2\sqrt{3}}{3}e-x}{x+\frac{\sqrt{3}}{3}e} \quad (7)$$

当完成 Z 向调焦运动时,各个压电陶瓷的 Z 向位移量分别为  $\Delta Z'''_A, \Delta Z'''_B, \Delta Z'''_C$ :

$$\Delta Z'''_A = \Delta Z'''_B = \Delta Z'''_C = -Z \quad (8)$$

此时,狭缝曝光场调平调焦的综合位移量  $\Delta Z_A, \Delta Z_B, \Delta Z_C$  为

$$\begin{cases} \Delta Z_A = \Delta Z'_A + \Delta Z''_A + \Delta Z'''_A \\ \Delta Z_B = \Delta Z'_B + \Delta Z''_B + \Delta Z'''_B \\ \Delta Z_C = \Delta Z'_C + \Delta Z''_C + \Delta Z'''_C \end{cases} \quad (9)$$

将(6)~(8)式代入式并写成矩阵形式可得

$$\begin{bmatrix} \Delta Z_A \\ \Delta Z_B \\ \Delta Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{y+e}{e-y} & 1 & 1 \\ \frac{y}{e-y} & \frac{\frac{2\sqrt{3}}{3}e-x}{x+\frac{\sqrt{3}}{3}e} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Z'_A \\ \Delta Z'_B \\ \Delta Z'_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

由调平调焦结构几何关系可得

$$\begin{cases} \Delta Z'_A = \tan r_x (e-y) \\ \Delta Z'_A = \tan r_y \left(x + \frac{\sqrt{3}}{3}e\right) \\ \Delta Z'''_A = -Z \end{cases} \quad (11)$$

考虑到实际使用硅片平整度及狭缝曝光场有限尺寸,  $\tan r_x \approx r_x, \tan r_y \approx r_y$ , 则(11)式可简化为

$$\begin{cases} \Delta Z'_A = r_x (e-y) \\ \Delta Z'_A = r_y \left(x + \frac{\sqrt{3}}{3}e\right) \\ \Delta Z'''_A = -Z \end{cases} \quad (12)$$

联立(10),(12)式可得

$$\begin{bmatrix} \Delta Z_A \\ \Delta Z_B \\ \Delta Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e-y & x+\frac{\sqrt{3}}{3}e & -1 \\ y+e & x+\frac{\sqrt{3}}{3}e & -1 \\ y & \frac{2\sqrt{3}}{3}e-x & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ Z \end{bmatrix} \quad (13)$$

(13)式即为调平调焦解耦算法,该算法将狭缝曝光场离焦量解耦为 3 个压电陶瓷的独立控制量并保证狭缝曝光场中心在调平调焦运动过程中不发生平移,进而避免了调平调焦运动对套刻精度产生影响。

### 3 仿真分析

由文献[10]可知,以直径 300 mm 硅片为研究对象,在曝光狭缝场 26 mm×8 mm 范围内,硅片形貌为  $h_{sf} \sim N(0, 30 \times 10^{-9})$ ,其中  $h_{sf}$  为硅片表面高度。不失一般性,任取一狭缝曝光场及其内部 4 个测量点(单位为毫米): $P_1(4, 12, 50 \times 10^{-6}), P_2(4, 8, 20 \times 10^{-6}), P_3(26, 12, -10 \times 10^{-6}), P_4(26, 8, -30 \times 10^{-6})$ 。将坐标点代入(2),(3)式可得: $a = -2.5 \times 10^{-6}, b = 6.25 \times 10^{-6}, c = -17.5 \times 10^{-6}$ ,即拟合的平面方程为

$$Z \times 10^6 = -2.5X + 6.25Y - 17.5 \quad (14)$$

由(5),(14)式可得曝光狭缝内离焦量为  $Z = 7.5 \times 10^{-6}$  mm,  $r_x = 6.25 \mu\text{rad}, r_y = -2.5 \mu\text{rad}$ 。以直径 300 mm 硅片为研究对象,则  $e = 260$ ,结合离焦量 ( $Z, r_x, r_y$ ) 代入(13)式,可得 3 个压电陶瓷的独立控制量:  $\Delta Z_A = 1.14$  nm,  $\Delta Z_B = 1.27$  nm,  $\Delta Z_C = -0.66$  nm。

此时,各测量点处的离焦量分别为  $\Delta Z_{P1} = 2.5$  nm,  $\Delta Z_{P2} = 2.5$  nm,  $\Delta Z_{P3} = -2.5$  nm,  $\Delta Z_{P4} = -2.5$  nm,能够满足高分辨力光刻机 10 nm 的调平调焦精度要求<sup>[10]</sup>。

## 4 结 论

介绍了双工件台光刻机中的焦面控制技术,分析了基于偏振调制的光栅检焦系统组成及其测量原理,推导了曝光狭缝内离焦量( $Z$ 、 $r_x$ 、 $r_y$ )计算方法,重点研究了一种保证狭缝曝光场中心在调平调焦运动过程中不发生平移的离焦量解耦算法;经仿真分析表明,该算法可用于调平调焦精度为 10 nm 的高分辨力光刻机。

### 参 考 文 献

- 1 Yao Hanmin, Hu Song, Xing Tingwen. Optical Projection Lithography for Micro and Nano-Fabrication [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006. 1~5  
姚汉民, 胡松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006. 1~5
- 2 Li Jinlong, Zhao Lixin, Hu Song *et al.*. Focusing and leveling in dual stage lithographic system [C]. *SPIE*, 2010, **7657**: 1024~1032
- 3 Y. Shibazaki, H. Kohno, M. Hamatani. An innovative platform for high-throughput, high-accuracy lithography using a single wafer stage[C]. *SPIE*, 2010, **7274**: 424~431
- 4 B. Sluijk, T. Castenmiller, R. C. de Jongh *et al.*. Performance results of a new generation of 300 mm lithography systems[C]. *SPIE*, 2001, **4346**: 544~557
- 5 R. Rubingh, Y. V. Dommelen, S. Tempelaars *et al.*. Performance of a high productivity 300 mm dual stage 193 nm 0.75 NA TWINSCAN™ AT: 1100 system for 100 nm applications[C]. *SPIE*, 2003, **4691**: 8~18
- 6 M. Boonman, C. van de Vin, S. Tempelaars *et al.*. The performance advantages of a dual stage system[C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 742~757
- 7 Li Xiaoping, Chen Feibiao, Li Zhidan *et al.*. A Kind of Focusing and Leveling Measurement Device [P]. Chinese Patent, CN200510025462. X, 2005-10-5  
李小平, 陈飞彪, 李志丹等. 一种调焦调平检测装置[P]. 中国专利, CN200510025462. X, 2005-10-5
- 8 Yan Wei, Li Yanli, Chen Mingyong. Moiré fringe-based focusing-test scheme for optical projection lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0805001  
严伟, 李艳丽, 陈铭勇. 基于光栅叠栅条纹的纳米检焦方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0805001
- 9 Li Xiaoping, Chen Feibiao. Measurement model of focusing and leveling measurement system for projection lithography tool[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1987~1991  
李小平, 陈飞彪. 投影光刻机硅片调焦调平测量模型[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1987~1991
- 10 Zeng Aijun, Wang Xiangzhao, Xu Deyan. Progress in focus and level sensor for projection lithography system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(7): 24~30  
曾爱军, 王向朝, 徐德衍. 投影光刻机调焦调平传感技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(7): 24~30

栏目编辑: 韩峰