

文章编号: 1003-501X(2004)12-0034-04

倾斜镜面成像的自动调焦方法

孟永宏^{1,2}, 靳刚¹

- (1. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 倾斜镜面成像系统的像面与光轴倾斜, 仅利用轴向自动调焦无法实现像面整体清晰。为此提出一种基于图像清晰度判断的自动调焦方法。该方法将轴向调焦与角度调焦相结合, 通过步进方式平移和旋转像接收面, 利用离焦函数判断聚焦情况, 采用数据拟合回归的方法实现了像面整体清晰。该方法在椭偏成像系统的应用结果验证了其有效性, 调焦精度达到微米量级。

关键词: 自动调焦; 角度调焦; 椭偏成像; 倾斜镜

中图分类号: TB851

文献标识码: A

An automatic focusing method for the imaging of an illumination-tilted specular-reflection imaging system

MENG Yong-hong, JIN Gang

- (1. State Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The image plane of illumination-tilted specular reflection imaging system (TSIS) is not perpendicular to the optical axes, which makes auto-focusing in optical axes direction unavailable. In order to solve this problem, an auto-focusing method based on image brightness gradient sharpness function is proposed, which combines auto-focusing in optical axes direction and angle-tilted auto-focusing by step moving and rotating imaging sensor successively. The auto-focusing method can make planar image clearly in whole image plane by using defocusing function and data fitting method. Experiment result from imaging ellipsometry system demonstrates its availability and its precision reaches micron order.

Key words: Automatic focusing; Angle focusing; Imaging ellipsometry; Tilt mirror

引言

纳米薄膜材料在分子生物学、生物化学、电化学、材料学、微电子学等领域具有广泛的应用, 与此同时, 纳米薄膜检测技术获得迅速的发展, 作为非接触、快速的纳米表面成像测量方法, 椭偏成像测量 (Imaging Ellipsometry, 简称 IE)^[1-3] 和等离子体共振成像 (Surface Plasma Resonance Imaging, 简称 SPRI)^[4-7] 技术可满足对纳米膜层进行纵向分辨率为纳米量级、横向分辨率为微米量级的检测。以成像的观点来看, 二者至少具有如下共同点: (1) 样品可视为二维平面 (因为薄膜厚度为纳米量级, 而横向尺度为毫米、甚至厘米量级); (2) 样品表面与光轴成一倾斜夹角; (3) 样品的表面接近镜面, 反射光波进入像接收器件。为讨论方便, 本

收稿日期: 2004-04-16; 收到修改稿日期: 2004-08-26

基金项目: (1) 国家自然科学基金资助项目 (90206029, 60178033); (2) 中国科学院知识创新工程重大项目 (KJX1-SW-07-03)

作者简介: 孟永宏 (1974-), 男 (汉族), 陕西大荔人, 工程师, 硕士生, 目前主要研究方向为纳米薄膜的光学检测方法、仪器及其在蛋白质芯片方面的应用, E-mail: yhong@imech.ac.cn。通讯作者简介: 靳刚 (1957-), 男 (汉族), 北京市人, 研究员, 博士, 博士生导师, 目前主要研究方向为纳米生物工程, 着重于光学生物传感器和光学蛋白质芯片研究。E-mail: gajin@imech.ac.cn

文把具有上述特点的系统称为倾斜镜面成像系统(Illumination-tilted specular-reflection imaging system, 简称为 TSIS)。

聚焦清晰是光学成像系统必需满足的首要条件。自动调焦作为重要的自动化技术已广泛应用于光学成像系统中,大致分为测距法和像检测法。前者通过系统主动地发出探测波测量物距,然后进行聚焦;后者通过对调焦引起的像质清晰度变化来判断是否聚焦清晰,其中的图像清晰度判断自动调焦应用最为广泛。目前,图像清晰度判断法的研究和应用集中在两方面:离焦函数的设计与选择^[8]和最佳成像位置的搜索方法^[9]。由于实际应用中大多数光学成像系统都是共轴系统,而且像接收面垂直于光轴,所以目前的自动调焦技术的研究和应用基本局限于轴向自动调焦,即沿轴向调节成像器件来实现自动聚焦。对于 TSIS 系统,由于物平面与光轴成一倾斜夹角,所以经透镜后其像平面也与光轴成一倾斜夹角,而且像与物不严格成比例。利用轴向自动调焦方法只能使样品上局部聚焦清晰而无法实现像面的整体清晰。为了得到准确的测量结果,可以通过平移物面、经多次成像后进行图像拼合的方法来达到,但此方法耗时较多。为了解决此问题,本文提出一种新型的自动调焦方法,它把角度调焦和轴向调焦相结合、通过像面步进和旋转调焦的方法实现像面的整体清晰。

1 TSIS 系统的自动调焦原理

在 TSIS 中利用像清晰度判断法进行自动调焦可充分利用已有器件和计算机的运算能力,而无须添加其它辅助器件。为达到像面的整体聚焦清晰,必须使像敏面同时达到沿光轴的轴向理想位置和相对于光轴的角度理想位置,在此提出适合 TSIS 系统的自动调焦方法:(1)调焦准备。使像敏面到达理想像面位置的附近,包括轴向位置和与光轴的夹角。(2)轴向调焦。在轴向理想位置邻域内调节物距(或像距),利用图像清晰度判断法使像敏面上与入射面垂直的中心线邻域达到聚焦清晰。首先搜索:在理想位置邻域内,电机驱动成像器件(成像透镜或像敏面)以一定的步距沿光轴方向平移从而改变物距(或像距)。每前进一个步距图像传感器进行图像采集,计算离焦函数值并作记录,然后利用数据拟合的方法得到最佳轴向位置。其次归位:把图像传感器驱动到理想成像位置。(3)角度调焦。在角度理想位置的邻域内,图像传感器沿其像敏面上与入射面垂直的中心线进行旋转调节,使整个视场内像面聚焦清晰。类似于轴向调焦,也分为搜索和归位两个步骤,只是将成像器件沿光轴的平移改为围绕通过像敏面几何中心的轴线在入射面内进行旋转。

选择适合系统的离焦函数至关重要,在以前对椭圆成像系统自动调焦研究中对离焦函数的选择进行了细致的讨论和比较。结果表明,Laplacian 函数在调焦范围内具有单峰性和较好的对比度,该函数的形式为

$$FM_{Lap} = \sum_x \sum_y [\nabla^2 g(x, y)]^2 \quad (1)$$

其中 $\nabla^2 g(x, y) = 4g(x, y) - g(x, y+1) - g(x, y-1) - g(x+1, y) - g(x-1, y)$ 。另外,采用多幅图像时间积分平均的方法对图像进行预处理可以有效地提高离焦函数的信噪比。

2 TSIS 系统的像面位置和调焦允许误差

要使 TSIS 系统物面上各点理想成像,可由麦克斯韦鱼眼透镜实现^[10],但像会有明显形变。鉴于实用的考虑,本文讨论的成像透镜仅限于普通的消色差共轴光学成像透镜。

2.1 理想像面的位置

图 1 为 TSIS 系统在通过光轴的入射面的成像示意图。由于各点物距不同,所以成像时垂轴放大率有差异,通过研究该平面内的成像可得到整个像面的性质。为了讨论方便,本文仅限于透镜两侧介质都是空气的情形,该条件

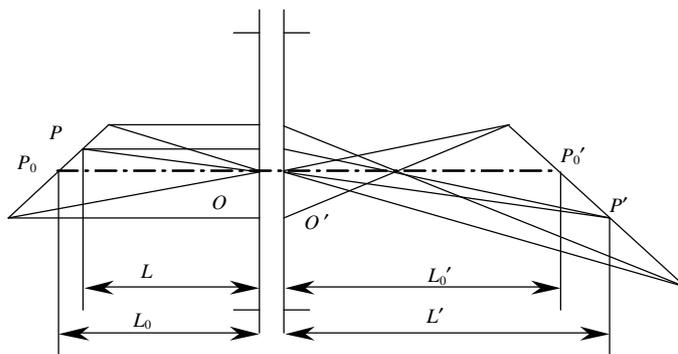


图 1 TSIS 系统成像示意图

Fig.1 Sketch for image with TSIS system

在实际中通常是满足的。设成像透镜焦距为 f' , 入射角为 ϱ ($0 < \varrho < 90^\circ$), 所以物面与成像系统光轴的夹角为 $(90^\circ - \varrho)$ 。物平面与光轴中心的交点为 P_0 , 其成像垂轴放大率为 \hat{a}_0 , 像点为 P_0' 。该入射面内物面上任一点为 P , 其像点为 P' , P 点的物距为 L 、物高为 y 、垂轴放大率为 b 、像距为 L' 、像高为 y' 。 t 为线段 $P_0 P$ 的长度, 当 P 点在光轴上方时 t 取正, 反之取负。

$$\text{由成像理论可得到 } P \text{ 点的垂轴放大率为 } b = 1/[(1/b) - ((t/f') \sin \varrho)] \quad (2)$$

$$P \text{ 点的像高与像距的关系为 } y' b_0 \tan \varrho + L' = f'(1 + b_0) \quad (3)$$

2.2 调焦允许的误差

为了确定调焦的最小步距, 下面采用几何方法对调焦允许的误差进行计算。首先讨论轴向调焦的情况。当物距不变而调节像距时, 即求焦深。设允许的弥散斑尺寸为 h , 成像系统的光阑孔径为 D 。由成像理论可得到总焦深为

$$\Delta L' = 2hf'(1 + b)/D \quad (4)$$

当像距不变而调节物距时, 即求景深。由几何成像公式和几何关系可得到总景深为

$$\Delta L = 2Dhf'(1 + b)/(b^2 D^2 - h^2) \quad (5)$$

取像面内合适的垂轴放大率 b_{\min} 带入(4)式和(5)式, 即可得到像面的最小焦深和最小景深。图2给出了角度调焦时允许的角度误差的示意图。 $A_1'B_1'$ 和 $A_2'B_2'$ 分别为像面形成的前后焦深面, 其方程分别为

$$y_1' = \frac{f'(1 + b_0) - DL'_1/(D - h)}{b_0 \tan \varrho} \quad (6)$$

$$y_2' = \frac{f'(1 + b_0) - DL'_2/(D + h)}{b_0 \tan \varrho}$$

像敏面允许的角度即为对角线 $A_1'B_2'$ 和 $A_2'B_1'$ 与光轴的夹角之差, 利用上式和像高公式可得到 $q = (q_{A_1'B_2'} - q_{A_2'B_1'})$, 在此不再赘述。

3 实验结果

下面给出 TSIS 系统自动调焦方法在椭偏成像系统中应用的实验结果。样品采用多元蛋白质芯片^[11], 芯片上蛋白单元的总面积为 $10.5\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ 。光学系统的设置为: 透镜焦距 $f' = 50\text{mm}$, 光阑为 $D = 50\text{mm}$, 入射角 $\varrho = 75^\circ$, 物平面与光轴中心交点 P_0 的垂轴放大率为 $\hat{a}_0 = 0.4$, CCD 像敏面尺寸为 $6.0\text{mm} \times 4.96\text{mm}$, 允许的弥散斑为 $h = 5\mu\text{m}$ 。图像传感器为 CCD 摄像头, 像敏面的轴向平移和旋转的机构分别采用精密滚珠丝杠副和精密蜗轮蜗杆副, 安装时保证 CCD 像敏面中线与转台轴线重合。运动部件采用步进电动机进行驱动, 步进电机驱动器采用电子细分技术以提高运动分辨率。

首先通过步进电机驱动像敏面到达理想轴向位置和像敏面与光轴的夹角位置。

其次进行轴向调焦, 在此采用移动像接收面的方法, 像面的最小焦深为 $13.8\mu\text{m}$ 。轴向调焦步骤为: (1) 在轴向位置邻域内, 步进电机驱动 CCD 摄像头以 $37.5\mu\text{m}$ 的步距沿轴向平移, 采用这样的步距是为了减少耗时。每平移一步 CCD 摄像头进行图像采集, 利用图像分析方法计算 Laplacian 离焦函数的值, 通过数据拟合的方法得到调焦区域中函数值最大的点作为最佳位置; (2) 按照优于最小焦深一半的步距 ($6\mu\text{m}$) 将 CCD 摄像头驱动到理想成像位置。完成轴向调焦后, 像敏面与入射面垂直的中心线邻域已经处于理想成像位置并达到聚焦清晰。图3给出了利用 100 幅连续图像时间积分平均预处理图像的方法得到的 Laplacian 离焦函数的归一化曲线。图中最高点对应于最佳轴向位置。

第三步角度调焦步骤 它与轴向调焦相似, 只是将 CCD 摄像头沿轴向的平移改为围绕其像敏面中心轴线在入射面内进行旋转。本实验中角度允许误差为 0.38° 。实验中 CCD 像敏面在步进电动机的驱动下以小于角度允许误差一半的步距 (0.0375°) 在理想位置附近内进行步进转动。在进行数据拟合得到最佳位置后将

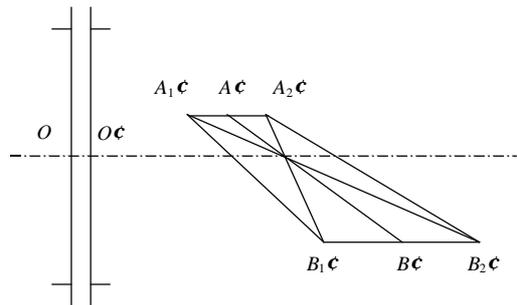


图2 角度允许误差示意图

Fig.2 Sketch for permissible angular error

其驱动到最佳位置。在完成角度调焦后，整个视场处于理想成像位置并达到视场内像面整体聚焦清晰。图 4 给出了利用 100 幅连续图像时间积分平均预处理图像的方法得到 Laplacian 离焦函数的归一化拟合曲线，CCD 的角度范围为 4° ，最高点对应于最佳的角度位置。

在进行 CCD 角度调焦时发现，当调节到理想成像位置时 CCD 像敏面上接收到的光照度明显小于 CCD 垂直于光轴时的情形，并且均匀光束照射在一个均匀的样品上，其像在偏离光轴的方向上亮度(在此与像面上的照度相同)依次

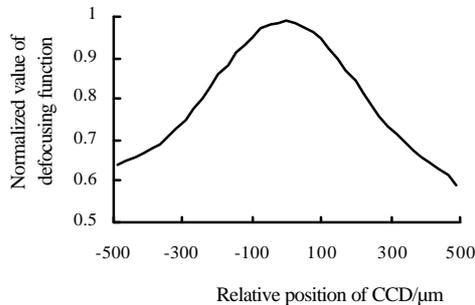


图 3 轴向调焦中 Laplacian 离焦函数的归一化拟合曲线

Fig.3 Normalized fitting curve for Laplacian off-focus function of axial focusing

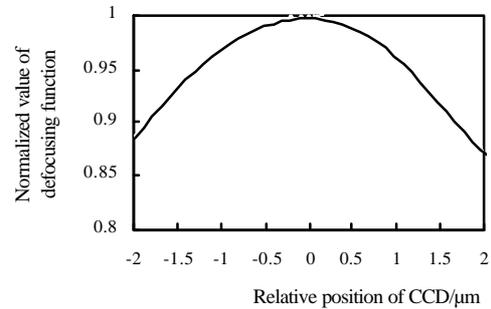


图 4 多幅图像时间积分平均后，角度调焦中 Laplacian 离焦函数的归一化拟合曲线

Fig.4 Normalized fitting curve for Laplacian off-focus function of angle-tilted focusing after time integration averaging of multi-frame image

降低。因此，有必要对像面上的亮度分布进行计算。另外，以成像测量的观点来看，要得到与物面亮度成比例的真实测量结果的图像，有必要对图像进行几何复原和亮度复原处理。由于此部分内容偏重于图像处理，故另文发表。此外，在进行角度调焦时，当 CCD 偏离垂直光轴位置很多时像面上出现一些均匀分布的斑点，这是由于倾斜的单色光照射在 CCD 表面上引起的干涉现象。

4 结论

本文针对 TSIS 系统的像平面与光轴有一倾斜夹角的特点，提出了一种基于图像清晰度判断的自动调焦方法。该方法将轴向调焦和角度调焦相结合，先后平移和旋转像接收面，利用离焦函数对像面聚焦质量进行分析，并通过数据拟合的方法得到了最佳的像接收面位置，从而达到像面整体清晰的目的。在椭圆成像系统中应用的实验结果表明像面整体的调焦精度在微米量级，并且优于像面内最小焦深的一半。为了提高精度，可以将轴向自动调焦和角度自动调焦反复进行多次。

由于采用了数据拟合的方法，而且选用的离焦函数具有单峰性，因此可以采用大步距进行搜索，然后采用小于允许调焦误差一半的步距进行归位。这样既可以达到小于一个焦深之内的精度，同时又有效地减少了搜索过程中的耗时。

本文给出的自动调焦方法，不但可以用于倾斜镜面成像系统的成像，也可以应用于样品垂直于光轴的成像系统的图像传感器像敏面的安装。

致谢：此研究中的样品由王战会和齐财制备，在此表示感谢。此研究得到了中国科学院重大项目和国家自然科学基金委的支持，谨此致谢。

参考文献：

- [1] COHN R F, WAGNER J W, KRUGER J. Dynamic imaging microellipsometry : theory, system design, and feasibility demonstration[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(22) : 4664-4671.
- [2] JIN G, TENGVALL P, LUNDSTRÖM I, et al. A Biosensor Concept Based on Imaging Ellipsometry for Visualization of Biomolecular Interactions[J]. *Analytical Biochemistry*, 1995, 232(1) : 69-72.
- [3] JIN G, ROGER J, HANS A. Imaging ellipsometry revisited : developments for visualization of thin transparent layers on silicon substrates[J]. *Review of Scientific Instrument*, 1996, 67(8) : 2930-2936.

(下转第 42 页)

- WANG Jian-min , PU Zhao-bang , ZHAO Hui , et al. A New Method for Calibrating 2D Image Measuring Systems[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology** , 2000 , 32(3) : 37-41.
- [4] 权铁汉 , 于起峰. 摄影测量系统的高精度标定与修正[J]. 自动化学报 , 2000 , 26(6) : 748-755.
QUAN Tie-han , YU Qi-feng. High-accuracy Calibration and Correction of Camera System[J]. **Acta Automatica Sinica** , 2000 , 26(6) : 748-755.
- [5] 双凯 , 董守平. 一种提高双目视觉测量精度的逐步逼近方法[J]. 光电工程 , 2000 , 27(3) : 30-33.
SHUANG Kai , DONG Shou-ping. A Progressive Approach Method for Improving the Accuracy of Binocular Vision Measurement[J]. **Opto-Electronic Engineering** , 2000 , 27(3) : 30-33.
- [6] PENNA M A. Camera Calibration a Quick and Easy Way to Determine the Scale Factor[J]. **IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence** , 1991 , 13(12) : 1240-1245.
- [7] GROSKY W I , Tamburino L A. A unified approach to linear camera calibration problem[J]. **IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence** , 1990 , 12(7) : 663-671.
- [8] WENG J Y , COHEN P. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. **IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence** , 1992 , 14(10) : 965-980.
- [9] 吴晓波 , 钟先信 , 刘厚权 , 等. 利用多项式插值函数提高面阵 CCD 尺寸测量的分辨率[J]. 仪器仪表学报 , 1996 , 17(2) : 154-159.
WU Xiao-bo , ZHONG Xian-xin , LIU Hou-quan , et al. Improving Resolution of CCD Camera in Dimensional Measurement by Polynomial Interpolation[J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument** , 1996 , 17(2) : 154 -159.
- [10] 赵建林 , 郝建华 , 李恩普 , 等. 提高 CCD 在激光三角测距中分辨率的方法[J]. 光子学报 , 1997 , 26(11) : 998-1002.
ZHAO Jian-lin , HAO Jian-hua , LI Enpu , et al. A Method of Improving CCD's Resolution in Laser Triangulation Measurement[J]. **Acta Photonica Sinica** , 1997 , 26(11) : 998-1002.
- [11] 谌廷政 , 吕海宝. CCD 细分技术方法研究及应用[J]. 光学学报 , 2002 , 22(11) : 1396-1399.
CHEN Ting-zheng , LÜ Hai-bao. CCD Subdivision Method and Application[J]. **Acta Optica Sinica** , 2002 , 22(11) : 1396-1399.
- ~~~~~
- (上接第 37 页)
- [4] JORDAN C E , CORN R M. Surface Plasmon Resonance Imaging Measurements of Electrostatic Biopolymer Adsorption onto Chemically Modified Gold Surfaces[J]. **Analytic Chemistry** , 1997 , 69(2) : 1449-1456.
- [5] BROCKMAN J M , FRUTOS A G , CORN R M. A Multistep Chemical Modification Procedure To Create DNA Arrays on Gold Surfaces for the Study of Protein-DNA Interactions with Surface Plasmon Resonance Imaging[J]. **Journal of the American Chemical Society** , 1999 , 121(35) : 8044-8051.
- [6] GUEDON P , LIVACHE T , MARTIN F , et al. Characterization and Optimization of a Real-Time , Parallel , Label-Free , Polypyrrole-Based DNA Sensor by Surface Plasmon Resonance Imaging[J]. **Analytic Chemistry** , 2000 , 72(24) : 6003-6009.
- [7] O' BRIEN M J , PÉREZ-LUNA V H , BRUECK S R J , et al. A surface plasmon resonance array biosensor based on spectroscopic imaging[J]. **Biosensors & Bioelectronics** , 2001 , 16(1-2) : 97-108.
- [8] SANTOS A , SOLÓRZANO C ORTIZ , VAQUERO J J , et al. Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis[J]. **Journal of Microscopy** , 1997 , 188(3) : 264-272.
- [9] KEHTARNAVAZ N , OH H J. Development and real-time implementation of a rule-based auto-focus algorithm[J]. **Real-Time Imaging** , 2003 , 9(3) : 197-203.
- [10] BORN M , WOLF E. **Principles of Optics : 7th (expended) edition** [M]. Cambridge : Cambridge University Press , 1999.
- [11] JIN G , WANG Z H. Micro-systems for Optical Protein-Chip[J]. **International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation** , 2002 , 3(3-4) : 191-194.