

基于改进椭圆偏振显微镜的纳米润滑薄膜动态观测

刘卿卿^{1,2,3}, 严 飞^{1,2,3}, 郭 颖^{1,2,3}

¹南京信息工程大学信息与控制学院, 江苏 南京 210044;

²江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;

³江苏省气象能源利用与控制工程技术研究中心, 江苏 南京 210044

摘要 随着硬盘(HDDs)面记录密度的增加,读写数据时磁头的飞行高度不断降低。磁头与磁片表面液体润滑膜的接触,会在表面形成半月板,或润滑剂回升,造成润滑剂转移。观测液体润滑膜的转移过程以及其在磁头上的动态变化特性,是研究润滑剂性能的重要方面。改进基于垂直物镜的椭圆偏振显微镜(VEM),提出一种旋转起偏器的方法获得膜厚与被测光强的线性关系,实现磁头表面润滑膜动态观察,并对现有显微镜尤其是照明系统进行改进。实验以非极性全氟聚醚(PFPE)润滑剂 Z03 覆盖的磁头为样品对椭圆偏振显微镜进行标定。以极性 PFPE 润滑剂 Zdol4000 作为样品,对其在磁头表面的去湿现象进行观察。结果证明显微镜横向分辨力约 $0.36 \mu\text{m}$ 。该方法可用于纳米级液体薄膜的可视化观测。

关键词 测量; 显微镜; 观测; 椭圆偏振显微镜; 润滑剂膜厚测量; 分辨力

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0812003

Dynamic Observation of Nanometer-Thick Lubricant Films Based on Improved Ellipsometric Microscope

Liu Qingqing^{1,2,3}, Yan Fei^{1,2,3}, Guo Ying^{1,2,3}

¹ School of Information and Control, Nanjing University of Information Science & Technology,
Nanjing, Jiangsu 210044, China;

² Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology,
Nanjing, Jiangsu 210044, China;

³ Jiangsu Engineering Research Center on Meteorological Energy Using and Control, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract As the recording density increasing in hard disk drives (HDDs), the head disk interface (HDI) spacing is decreasing during its operation of reading and writing. The meniscus is formed or the lubricant picks up when the head slider contacts with the liquid lubricant film on the disk surface, which makes the lubricant to transfer. Therefore, the transfer process of observing lubricant film and its dynamic change characteristics on the head are important aspects for studying the performance of lubricant. A vertical-objective-based ellipsometric microscope (VEM) is developed. The linear relationship between the thickness and the light intensity is obtained by phase shift of polarizer, which realizes the dynamic visualization of lubricant film on the surface of the head. The present microscope and illumination system are improved. In the experiment, the nonpolar perfluoropolyether (PFPE) lubricant Z03 is applied on the head to calibrate the ellipsometric microscope. The polar PFPE lubricant Zdol4000 is applied as the sample. Its dewetting phenomenon on the surface of the head is observed. The result shows that the lateral resolution of the microscope is $0.36 \mu\text{m}$. The proposed method can be used for the visual observation of the nanometer-thick lubricant films.

Key words measurement; microscopy; observation; ellipsometric microscope; thickness measurement of lubricant

收稿日期: 2017-02-06; 收到修改稿日期: 2017-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61605083)、江苏省自然科学基金(BK20130989)、南京信息工程大学大学引进人才科研启动项目(2013R106)

作者简介: 刘卿卿(1983—),女,博士,讲师,主要从事偏振光学仪器及光电检测方面的研究。

E-mail: sherryliuqq@163.com

film; resolution

OCIS codes 120.2130; 110.0180; 350.4600; 310.6845

1 引 言

计算机硬件技术发展至今,机械式硬盘(HDD)仍然因其存储容量大,性能稳定,价格低廉被广泛应用于计算机系统中。聚全氟甲基异丙基醚(PFPE)具有粘度高、表面张力低、难挥发且热稳定性好等特性被广泛用作磁盘润滑剂。随着 HDD 面记录密度的增加,其读写数据时磁头的飞行高度会不断降低,甚至达到 $2\sim 3\text{ nm}^{[1-2]}$ 。读取数据时,磁头与磁片表面液体润滑膜的接触会造成润滑剂回升,甚至残留于磁头上,引起润滑剂转移^[3-4]。因此,盘片表面液体润滑膜的动态特性将直接影响 HDD 的性能。观测液体润滑膜的转移过程以及在磁头上的动态变化特性,是研究润滑剂性能的重要方面,也是提高磁盘工作稳定性的基础。

椭偏仪是一种常用的膜厚及材料属性的测量仪器,具有较高的测量分辨力^[5]。传统椭偏仪测量用光斑直径一般在 $3\sim 25\text{ mm}$ 范围内^[6],在进行较小面积的测量时,对于小于光斑照射区域内的被测点微小变化难以准确检测,甚至出现对焦困难的情况,且其测量膜厚时需要逐点扫描,因而无法进行动态观测。椭圆偏振光显微镜基于传统椭偏仪的原理发展而来,其无需扫描即可实现纳米级精度的薄膜非接触可视化检测,因此越来越受到国内外学者的关注。Henon S 等^[7]利用倾斜物镜式的偏振显微镜对单层膜结构进行观测,以传统商用椭偏仪为模型,采用宽光束照明,并以电荷耦合器件(CCD)摄像机作为成像器件,实现了观测目的。其观测范围为 $200\text{ }\mu\text{m}\times 200\text{ }\mu\text{m}$,分辨力为 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 。陈修国等^[8]将 Mueller 矩阵椭偏仪与显微成像技术相结合,进行纳米级结构的几何参数测量,获得毫米级测量面积,但横向分辨力只有几微米。Jin G 等^[9]以及 Kajihara Y 等^[10]分别采用两段式的反射光接收系统,减小物镜的倾斜角度,从而降低其对分辨力的限制,分辨力可提高到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下。但其主要缺点是系统结构较为复杂,对于操作要求较高,性能不稳定。Neumaier K R 等^[11]提出了垂直物镜的偏振显微镜,其入射光线会聚于物镜后焦平面,以实现光线倾斜入射,而分辨力与观测范围不再受到物镜的制约。在过去的研究中,使用垂直物镜的椭圆偏振显微镜的方法已经实现了对磁盘表面润滑膜的观察,然而其膜厚分辨力较低,对于反射率较低的磁头观测不适用,且膜厚测量时需要经过数次起偏器相移,耗时较长,动态观测效果不理想^[12]。因此,本文改进现有垂直物镜的椭圆偏振显微镜(VEM)以提高其膜厚分辨力,同时采用旋转起偏器方法获得膜厚与探测光强的线性关系,实现磁头表面润滑膜观测的同时测量膜厚。以非极性润滑剂 Z03 覆盖的磁头为样品对椭圆偏振显微镜进行标定,以极性润滑剂 Zdol4000 为样品对其在磁头表面的去湿现象进行观察。

2 椭圆偏振显微镜的测量原理

椭偏法测膜厚中,以单色平行偏振光源照射待测样品,经过样品的反射,其反射光线的偏振态发生变化。根据菲涅耳公式,当样品厚度小于入射光线的波长 λ 时,样品介质的光学特性如折射率 n 、厚度 h 可由反射光线的偏振态获得^[13]。因此以反射光作为被测量,通常采用椭偏参数 ψ 和 Δ 来表征反射光偏振态的变化,其关系为

$$\tan \psi \cdot \exp(i\Delta) = \frac{R_p}{R_s} = \frac{|R_p|}{|R_s|} \cdot \exp(i\Delta), \quad (1)$$

式中, R_p 、 R_s 分别为 p 分量和 s 分量的复反射系数,为入射角 θ 、入射光波长 λ 、介质折射率 n 和介质厚度 h 的函数。对于多层结构,其可由 2×2 矩阵法计算获得^[13]。因此,在已知入射角、入射光波长以及各介质折射率的条件下,椭偏参数 ψ 和 Δ 仅与薄膜厚度 h 有关。根据 Fukuzawa 等^[14]的研究,反映反射光强与椭偏参数关系的经验式为

$$I = \frac{R_s^2 I_0}{2} \cdot [r^2 \cos^2 A + 2r \sin A \cos A \sin(2P + \Delta) + \sin^2 A], \quad (2)$$

式中, r 为 p 分量与 s 分量的振幅比, I_0 为入射光强, P 为起偏器相位角, A 为检偏器相位角。

由(2)式可知,反射光强不仅与膜厚 h 有关,也与起偏器和检偏器的相位角 P 、 A 有关。理论上,对于任意膜厚,反射光强为 0 时,为消光条件。根据(2)式,可确定消光条件,即

$$2P + \Delta = \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

$$r \cos A + \sin A = 0. \quad (4)$$

满足(3)、(4)式时,反射光强值为0,即为消光条件。椭圆偏振显微镜测量中,以无润滑膜覆盖的裸露磁头表面的消光条件作为基准,相应各参量加下标d。因此,在无润滑膜覆盖时,调整起偏器和检偏器相位角度,使输出的反射光强最低,获得裸露磁头的 P_d 与 A_d ,继而获得 Δ_d 与 r_d 。

磁头模型如图1所示。其层状结构从上至下依次为空气层,润滑膜以及磁头基层,其复折射率分别为1,1.3和 $1.98 + 0.377i$,润滑膜与磁头基层的厚度分别为 $0 \sim 500$ nm 和 ∞ 。入射光波长 $\lambda = 460$ nm,入射角 $\theta = 70^\circ$,可求得 $P_d = 230^\circ, A_d = 141^\circ$,以及不同膜厚相应的偏振分量相位差 Δ 。满足消光条件时,膜厚与入射光强的关系如图2所示。

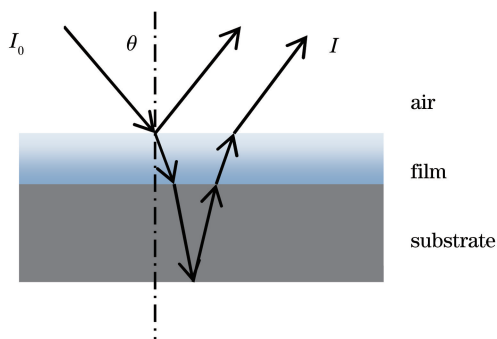


图1 磁头模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of head model

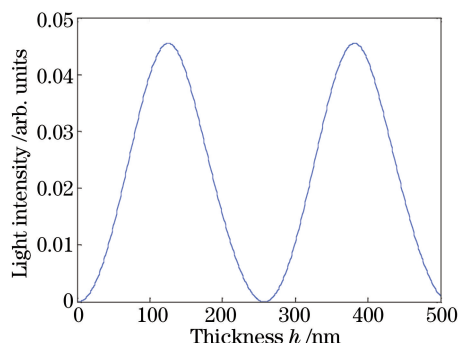


图2 探测光强 I 与膜厚 h 的关系

Fig. 2 Relationship of light intensity on detector I and film thickness h

保持检偏器相位角 $A_d = 141^\circ$ 不变,改变起偏器相位角 P ,则探测光强与膜厚之间的关系将发生变化。如图3所示,当 P 约为 200° 时,探测光强与膜厚成线性关系,且随着膜厚增加,光强逐渐降低。利用该特点,可以实现液态润滑膜动态观察的同时实时读取膜厚测量数据。

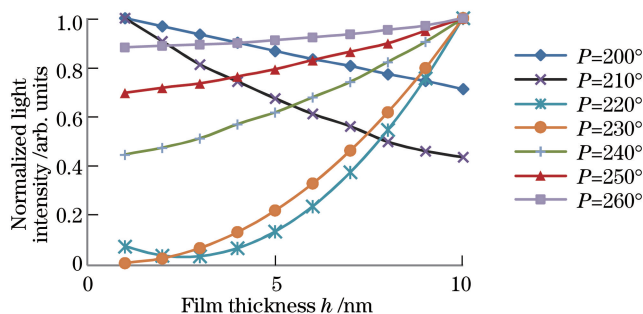


图3 不同起偏角情况下探测光强 I 与膜厚 h 的关系

Fig. 3 Relationship of light intensity on detector I and film thickness h with different polarizing angles

3 测量装置设计

3.1 VEM 的工作原理

根据椭偏仪的测量原理,入射角 θ 为布儒斯特角时,反射的偏振光具有较好的膜厚分辨力,因此椭偏仪通常采用入射光源与物镜倾斜放置。物镜的数值孔径 NA 越大,则显微镜的分辨力越高,但是测量范围越狭窄。因此为了同时保证高分辨力和大范围观测,提出了垂直物镜式椭圆偏振显微镜。其结构示意图如图4所示,主要由照明系统、显微成像系统、偏振元件、CCD相机等组成。照明系统偏离主光轴放置,且偏离位移大小可调节。显微成像系统由聚焦透镜(焦距 $f = 200$ mm)以及物镜等组成。物镜(MPlanApo $50\times, NA = 0.95$, Olympus)垂直于被测样品平面放置,光源成像于垂直物镜的后焦平面,偏离主光轴一定位移,实现倾

斜平行光照明,如图 5 所示,偏移距离和物镜焦距均较小,入射角 θ 与偏离位移 s 之间满足

$$\sin \theta = \frac{s}{f_0}, \quad (5)$$

式中 f_0 为物镜焦距,为 3.6 mm。偏振元件包括起偏器、1/4 波片和检偏器,用于将经薄膜反射的偏振光相位和振幅的变化转化成光强的明暗变化。高速 CCD 相机(Cascade II; 512, Photometrics)像面尺寸为 8 mm×8 mm,像素为 512 pixel×512 pixel,系统放大率为 50 倍,因此其成像范围为 160 μm×160 μm。物镜的数值孔径 NA 为 0.95,根据瑞利判据,其衍射极限分辨力可达亚微米级。因此根据上述物镜及 CCD 相机理论上可实现大视场及高分辨力观测。

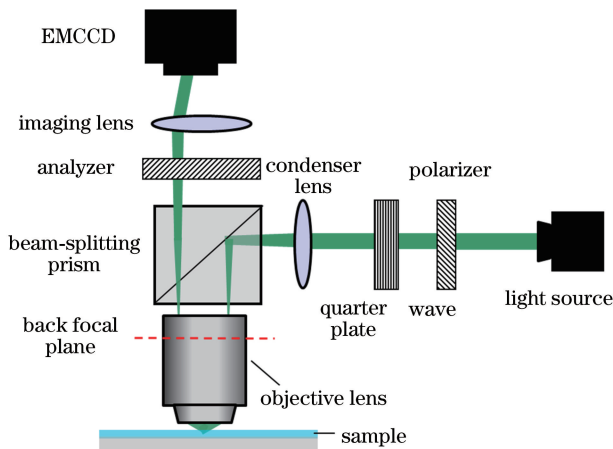


图 4 VEM 结构示意图

Fig. 4 Schematic of VEM structure

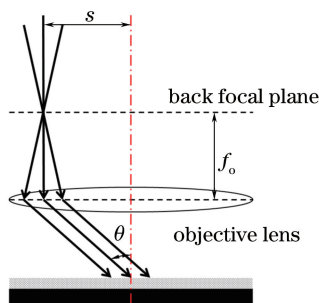


图 5 物镜后焦平面光线会聚示意图

Fig. 5 Schematic diagram of light converging on back focal plane of objective lens

3.2 照明光源设计

在椭圆偏振显微镜中,照明光源直接影响系统成像质量。因此为了提高系统成像质量,从以下两方面进行照明光源设计。1)光源选择:VEM 系统中,以 CCD 相机探测的光信号的信噪比定义系统的膜厚分辨力,信噪比越高,其分辨力越强。不考虑其他因素,对于光电成像系统,其信噪比正比于入射光强的平方根^[15],采用大功率光源可提高 CCD 相机探测信号的信噪比。本系统选用大功率 LED 光源(XLED1, X-Cite, 波长 $\lambda=460$ nm),其与激光相比具有较大的光谱宽度,以抑制时间干涉。2)光源尺寸的确定:如前所述,通过改变起偏器角度,获得膜厚与入射光强呈线性关系的条件从而进行润滑膜动态观测及膜厚测定。因此单位膜厚偏振图像的对比度越强,则其膜厚分辨力越高。偏振图像对比度可以定义为

$$C_e = \frac{I_d - I}{I_d}, \quad (6)$$

式中 I_d 为无润滑膜覆盖部分的探测光强, I 为任意膜厚时的探测光强。图 6 模拟了膜厚为 1 nm 时偏振图像对比度与入射角之间的关系。由图可知,当入射角 $\theta=70^\circ$ 时图像具有较高的对比度。因此根据(5)式调整光源位置,理论上可实现 $\theta=70^\circ$ 。然而实际光源并非理想点光源,由(5)式可知,扩展光源在物镜后焦平

面成像,光源像面各点与光轴的偏离位移 s 不同,因此造成入射角 θ 具有一定范围。例如,若扩展光源直径为 1 mm,则根据设计,其物镜后焦平面成像直径为 4 mm,入射角 θ 范围为 $22.8^\circ \sim 90^\circ$,会造成对比度下降。因此实际设计时加入针孔以控制入射角范围,进而提高成像对比度。然而,如图 7 所示,随着针孔直径减小,干涉效应增强。因此选取直径 100 μm 针孔,最终的照明光源设计如图 8 所示。

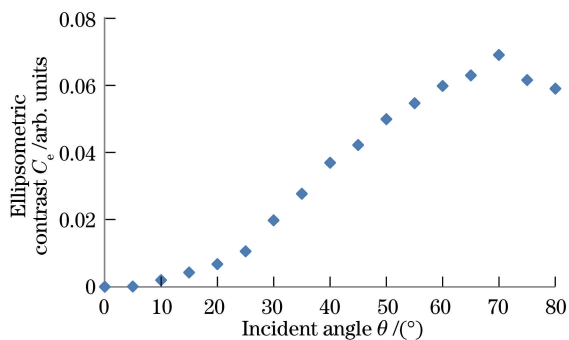


图 6 膜厚 $h = 1 \text{ nm}$ 时,对比度 C_e 与入射角 θ 关系的模拟曲线

Fig. 6 Simulated relationship between contrast ratio C_e and incident angle θ when film thickness $h = 1 \text{ nm}$

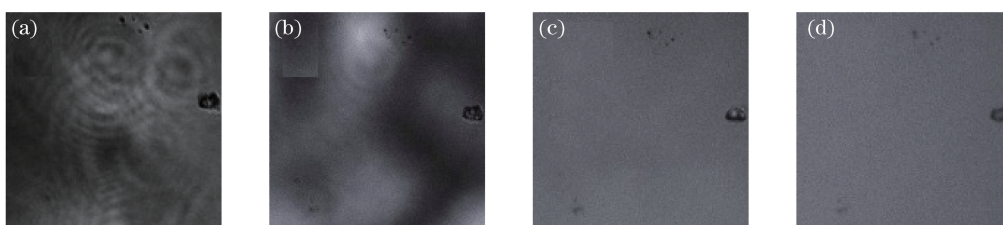


图 7 针孔直径不同时的显微图像。(a) 20 μm ; (b) 50 μm ; (c) 100 μm ; (d) 1 mm

Fig. 7 Microscopic images for different pinhole diameters. (a) 20 μm ; (b) 50 μm ; (c) 100 μm ; (d) 1 mm

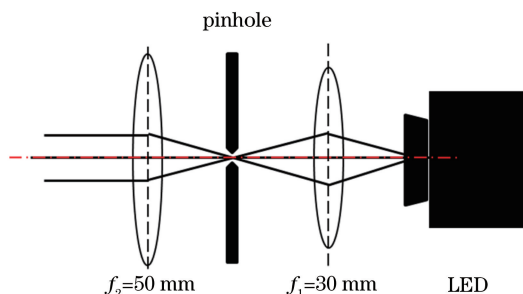


图 8 光源示意图

Fig. 8 Schematic of light source

4 实验结果与讨论

4.1 实验材料及制备

样品选用 TOSHIBA 公司生产的磁头以及润滑剂 PFPE(Zdol4000 和 Z03),其中 Zdol4000 为极性润滑剂,Z03 为非极性。二者具有相同的分子量以及折射率($n = 1.3$)。采用浸润法实现润滑膜的制备。将磁头匀速浸入润滑液中,并以同样速度取出,改变润滑液的浓度以及浸润速度,可控制附着的润滑膜厚度。

4.2 横向分辨力

VEM 物镜的数值孔径 $NA = 0.95$,入射光波长 $\lambda = 460 \text{ nm}$,其分辨力理论值为 $0.61\lambda/NA \approx 0.30 \mu\text{m}$ 。图 9 为 VEM 下 USAF1951 分辨率板的分辨力测试结果。USAF1951 分辨率板的测量最小线宽为 $0.548 \mu\text{m}$,因此可测定最小分辨力为 $0.548 \mu\text{m}$ 。本实验采用刀口目标成像法测定显微镜的分辨力^[16-17]。其方法是:1)选取刃边图像如图 10 所示,求其边缘扩展函数(ESF)。图像的每一行得到一条 ESF 曲线,图像

具有 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 因此, 认为图像有 512 行, 则可得到 512 条 ESF 曲线。2) 对上述 512 条 ESF 曲线分别进行微分, 与相邻点差值最大的一点即为刃边点。对得到的 512 个刃边点进行最小二乘拟合, 将所有刃边点拟合到一条直线上。3) 为了使曲线更平滑, 对每条 ESF 曲线进行样条插值。然后对各条 ESF 曲线求平均值, 得到一条平均 ESF 曲线, 以降低噪声影响, 如图 11(a)、(d) 所示。4) 对平均 ESF 曲线求微分得到线扩展函数(LSF)曲线, 如图 11(b)、(e) 所示。5) LSF 曲线经傅里叶变换, 并对各频率分量取模, 得到调制传递函数(MTF)曲线。随着空间频率增加, MTF 值减小。根据瑞利判断, 成像光学系统的 MTF 为 0.1 时对应的空间频率即为光学系统的分辨力。

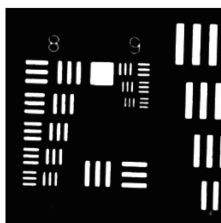


图 9 VEM 下的 USAF1951 分辨率板的分辨力测试结果

Fig. 9 Resolution test result of USAF1951 resolving power test target pattern taken by VEM

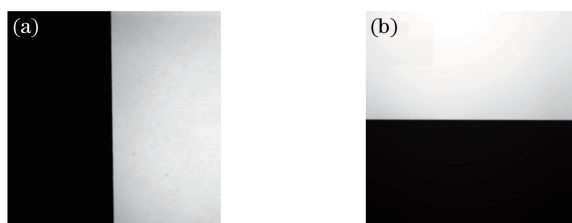


图 10 VEM 下的刃边图像。(a)刃边平行于入射面;(b)刃边垂直于入射面

Fig. 10 Knife-edge image taken by VEM. (a) Knife-edge parallel to the incident plane;

(b) knife-edge perpendicular to the incident plane

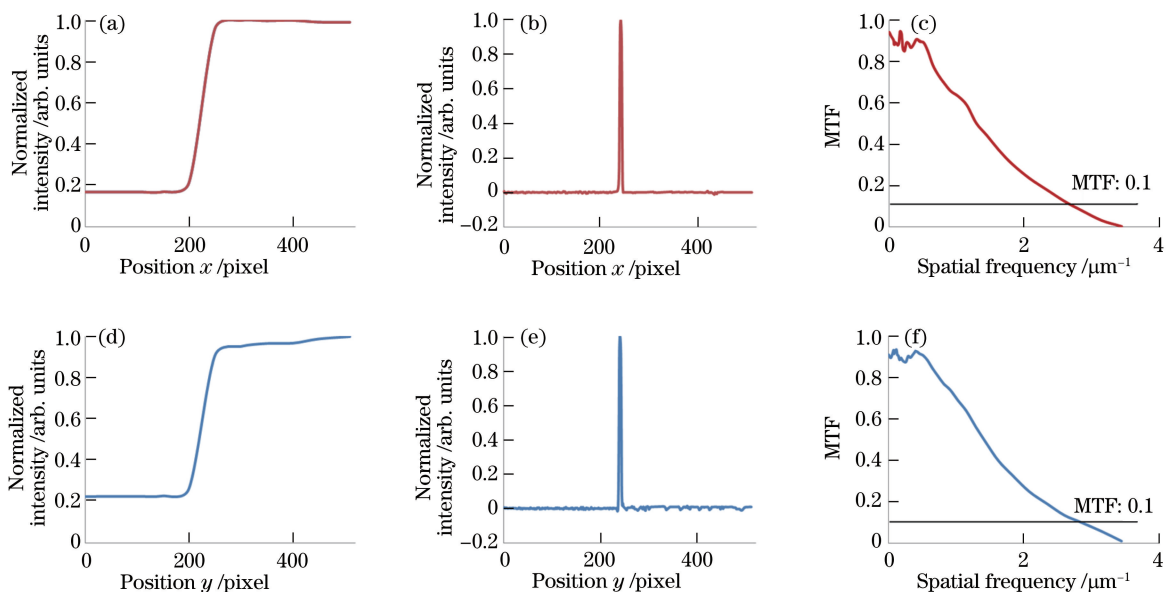


图 11 刀口目标成像法所得 VEM 的分辨力。(a)、(b)、(c)分别为水平方向的 ESF、LSF 和 MTF 曲线;

(d)、(e)、(f)分别为垂直方向的 ESF、LSF 和 MTF 曲线

Fig. 11 Resolution of VEM obtained by knife-edge imaging. (a), (b), (c) are the ESF, LSF and MTF curves in the horizontal direction, respectively; (d), (e), (f) are the ESF, LSF and MTF curves in the vertical direction, respectively

根据上述方法,得到 VEM 的 MTF 曲线如图 11(c)、(f)所示。图中横轴表示空间频率,纵轴为 MTF 值。系统采用大 NA 物镜,光源成像在物镜后焦平面,成像不对称引起像差增大,进而影响显微镜分辨力^[18],故对图像水平及垂直两方向分别采用刀口法求解其 MTF 值。对应的空间频率分别为 $2.8 \mu\text{m}^{-1}$ 和 $3.0 \mu\text{m}^{-1}$,实验测得 VEM 水平方向及垂直方向分辨力约为 $0.36 \mu\text{m}$ 和 $0.33 \mu\text{m}$ 。由此可知,轴外点像差影响测量分辨力,但作用效果不大,实验测定分辨力与理论值相吻合。VEM 与其他倾斜物镜的椭圆偏振显微镜相比,横向分辨力显著提高。

4.3 膜厚测定与润滑膜去湿现象动态观测结果

调整显微镜,以裸露磁头作为观测样品,调整起偏器和检偏器角度,使得视场光强最低,此时即为消光条件。以 Z03 作为润滑膜样品,制备不同膜厚覆盖的磁头样品用于仪器定标。以原子力显微镜(AFM)测定的膜厚值作为真值,固定检偏器,旋转起偏器角度获得反射光强与膜厚之间的线性关系。图 12 为归一化的光强与膜厚的关系曲线。由图 12 可知,当旋转起偏器时,探测光强与膜厚的关系发生改变,其结果与理论计算结果基本吻合。当起偏角为 202° 时,VEM 可实现将反射光强直接转化为膜厚信息,光强与膜厚的线性关系式为 $I=1-0.071h$,因此该显微系统可以实时获取磁头表面膜厚信息,更适用于膜厚变化的动态观测。

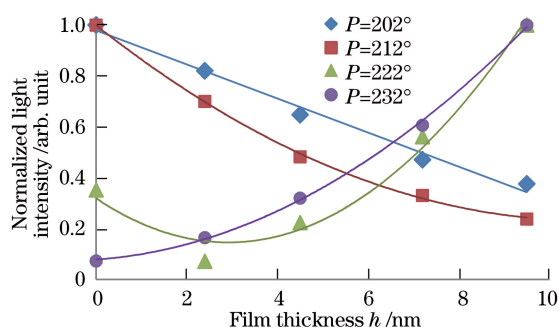


图 12 归一化反射光强与非极性润滑膜膜厚关系

Fig. 12 Relationship between the normalized reflected light intensity and film thickness of nonpolar lubricant film

采用极性润滑剂 Zdol4000 作为润滑膜样品,将一定厚度的极性润滑膜作用于磁头表面,其状态不稳定,会产生去湿现象。本实验设计对初始膜厚约为 6 nm 的磁头去湿现象进行观测,观测结果如图 13、14、15 所示。视频拍摄开始于镀膜结束后 5 min 30 s,CCD 相机拍摄速率为 10 frame/s。图 14 为图 13 左上角方框区域的放大图像。图 15 为图 14 中线 L 处的剖面图,测量点位置为 $x=0\sim 80 \mu\text{m}$ 。实验样品 AFM 测定初始膜厚为 6.7 nm。对于 VEM 的观测结果,图 14(a)中左侧较为平坦的部分其膜厚约为 6.8 nm,可视为初始膜厚,非单分子层,因此表面一层 Zdol 分子状态不稳定,镀膜后产生去湿现象。图中灰度变化即为光强变化,反应膜厚变化。去湿过程边缘向中心推进,去湿向着磁头表面构造线方向收缩,开始时,边缘会产生厚度 10 nm 以上的润滑膜突起,并且其宽度从 $2\sim 10 \mu\text{m}$ 向着镀膜的一边逐渐扩大,润滑膜不断收缩增厚,最终会聚成滴。由此可见,所研制的 VEM 可实现液体润滑膜动态特性观测。

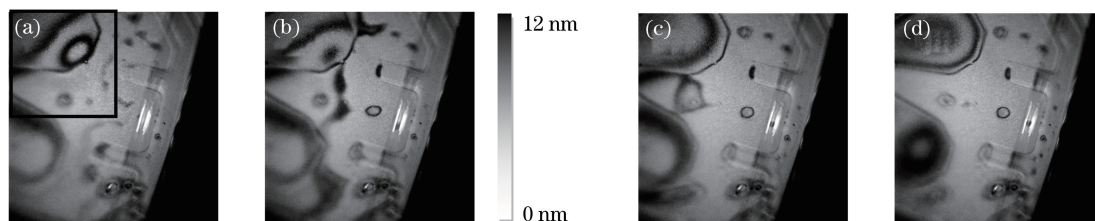


图 13 镀膜结束后不同拍摄时间的磁头润滑膜去湿现象观测图像。(a) 5 min 30 s;(b) 5 min 50 s;(c) 6 min 10 s;(d) 6 min 30 s

Fig. 13 Dewetting images of lubricant film on the head obtained at different shooting times after film coating.
(a) 5 min 30 s; (b) 5 min 50 s; (c) 6 min 10 s; (d) 6 min 30 s

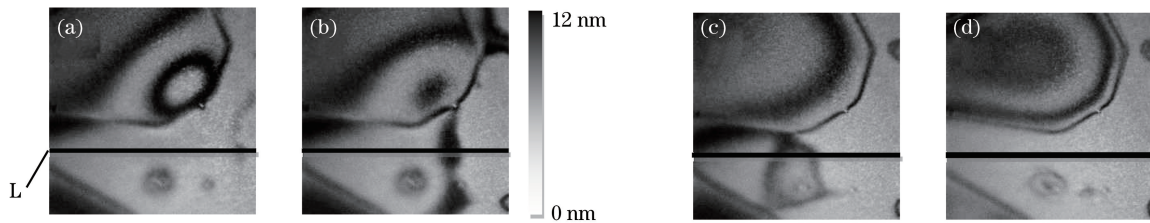


图 14 镀膜结束后不同拍摄时间获得的图 13 左上角方框区域中磁头润滑膜去湿现象的放大图像。

(a) 5 min 30 s; (b) 5 min 50 s; (c) 6 min 10 s; (d) 6 min 30 s

Fig. 14 Magnified images of the head lubricant dewetting phenomenon in the upper left rectangle area of Fig. 13 obtained at different shooting times after film coating. (a) 5 min 30 s; (b) 5 min 50 s; (c) 6 min 10 s; (d) 6 min 30 s

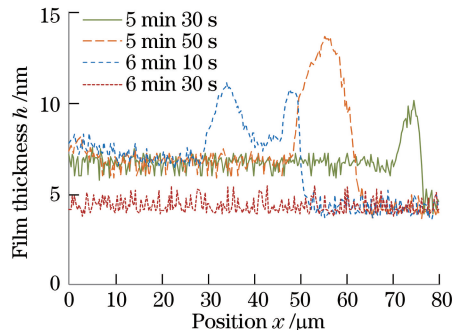


图 15 图 14 中线 L 处的切面图

Fig. 15 Cross-sectional view at central line L in Fig. 14

5 结 论

本文改进了垂直物镜的椭圆偏振显微镜,引入针孔设计照明系统,提高显微镜的偏振对比度,采用旋转起偏器的方法获得膜厚与被测光强的线性关系,实现磁头表面润滑膜动态观察。以刀口目标成像法测定显微镜的分辨力约 $0.36 \mu\text{m}$ 。以极性润滑剂 Zdol4000 作为样品,对其在磁头表面的去湿现象进行了观测。结果进一步证明该方法具有观测范围大、亚微米分辨力的特点,可以实现磁头表面纳米厚度润滑膜的动态特性观测。该方法为研究磁头/磁盘润滑剂转移特性提供了实验支持。

参 考 文 献

- [1] Eleftheriou E, Haas R, Jelitto J, *et al.* Trends in storage technologies[J]. IEEE Data Engineering Bulletin, 2010, 33(4): 4-13.
- [2] Shi Baojun, Ji Jiadong, Yang Tingyi. Effects of surface roughness on static characteristics of air bearing films in hard disk drives with ultra-low flying heights[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 93-99.
史宝军, 季家东, 杨廷毅. 表面粗糙度对硬盘超低飞高气膜静态特性的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 93-99.
- [3] Pan Deng, Yan Hui, Jiang Hongyuan. Lubricant transfer mechanism and process between slider and disk[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(12): 128104.
潘 登, 闫 辉, 姜洪源. 磁头/磁盘间润滑剂转移机理及影响因素[J]. 物理学报, 2014, 63(12): 128104.
- [4] Tani H, Koganezawa S, Tagawa N. Reduction in lubricant pickup by bias voltage between slider and disk surfaces[J]. Microsystem Technologies, 2016, 22(6): 1221-1225.
- [5] Song Guozhi, Liu Tao, Chen Yaqin, *et al.* Calibration of spectroscopic ellipsometer using multiple standard samples [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0312003.
宋国志, 刘 涛, 湛雅琴, 等. 利用多个标准样品校准光谱椭圆偏振仪[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0312003.
- [6] Losurdo M, Bergmair M, Bruno G, *et al.* Spectroscopic ellipsometry and polarimetry for materials and systems analysis at the nanometer scale: state-of-the-art, potential, and perspectives[J]. J Nanopart Res, 2009, 11(7): 1521-1554.

- [7] Henon S, Meunier J. Microscope at the Brewster angle: Direct observation of first-order phase transitions in monolayers[J]. *Rev Sci Instrum*, 1991, 62(4): 936-939.
- [8] Chen Xiuguo, Yuan Kui, Du Weichao, *et al.* Large-scale nanostructure metrology using Mueller matrix imaging ellipsometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(7): 070703.
陈修国, 袁 奎, 杜卫超, 等. 基于 Mueller 矩阵成像椭圆偏仪的纳米结构几何参数大面积测量[J]. *物理学报*, 2016, 65(7): 070703.
- [9] Jin G, Jansson R, Arwin H. Imaging ellipsometry revisited: Developments for visualization of thin transparent layers on silicon substrates[J]. *Rev Sci Instrum*, 1996, 67(8): 2930-2936.
- [10] Kajihara Y, Fukuzawa K, Itoh S, *et al.* Theoretical and experimental study on two-stage-imaging microscopy using ellipsometric contrast for real-time visualization of molecularly thin films[J]. *Rev Sci Instrum*, 2013, 84(5): 053704.
- [11] Neumaier K R, Elender G, Sackmann E, *et al.* Ellipsometric microscopy[J]. *Europhys Lett*, 2000, 49(1): 14-19.
- [12] Fukuzawa K, Liu Q, Tarukado T, *et al.* Novel methods for real-time observation of molecularly thin lubricant films by ellipsometric microscopy: application to dewetting observation[J]. *IEEE Trans Magn*, 2013, 49(6): 2530-2534.
- [13] Azzam R M A, Bashara N M. *Ellipsometry and polarized light*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1986: 332-351.
- [14] Fukuzawa K, Noda T, Mitsuya Y. Direct visualization of molecularly thin lubricant films on magnetic disks with a digitally enhanced ellipsometric microscope[J]. *IEEE Trans Magn*, 2003, 39(2): 898-902.
- [15] Horowitz P, Hill W. *The art of electronics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989: 166-172.
- [16] Yuan Hangfei, Guo Yongfei, Si Guoliang, *et al.* MTF measurement method based on slanted-edge image simulated by normal distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0712001.
袁航飞, 郭永飞, 司国良, 等. 正态分布模拟倾斜刃边图像的 MTF 测量方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0712001.
- [17] Sun Chongshang, Wang Qi, Ding Yalin, *et al.* Modulation transfer function measurement of image motion of aerial camera based on slanted-edge method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1212001.
孙崇尚, 王 琦, 丁亚林, 等. 基于倾斜刃边法航空相机像移的调制传递函数测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1212001.
- [18] Xiao Yun, Zhang Yunhai, Yang Haomin, *et al.* Focusing of high numerical aperture azimuthally polarized beams[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 031801.
肖 昀, 张运海, 杨皓旻, 等. 大数值孔径物镜下角向偏振光聚焦特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 031801.