

泄漏辐射模显微镜测量薄膜的局域双折射率

阎 杰 鲁拥华* 王 沛 明 海

(中国科学技术大学光学与光学工程系,安徽省光电子科学与技术重点实验室,安徽 合肥 230026)

摘要 介质双折射率的传统测量方法有偏振光椭圆率测量仪和光学相干断层扫描等。提出一种新型的介质双折射率测量方法——切向偏振光照明的泄漏辐射模显微镜激励波导模共振,通过对物镜后焦面的傅里叶光谱信息进行成像,测量介质的双折射率。分析了利用切向偏振光照明的泄漏辐射模显微镜测量介质双折射率的原理并测量了双折射率差为 $\Delta n \approx 0.005$ 的偶氮聚合物薄膜的光致双折射效应,该方法可实现高灵敏度、高空间分辨率的双折射率测量。

关键词 测量;双折射;切向偏振光;波导模共振

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0112001

Local Birefringence of Anisotropic Film Measured by Leaky Radiation-Mode Microscope

Yan Jie Lu Yonghua Wang Pei Ming Hai

(Anhui Key Laboratory Optoelectronic Science and Technology, Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract There are several methods for birefringence measurement such as ellipsometer and optical coherence tomography. A novel method for birefringence measurement is proposed. The waveguide-mode resonance is excited by leaky radiation-mode microscope with azimuthally polarized beam illumination. By observe the Fourier spectrum on back focal plane, the birefringence character can be measured. The principle of birefringence measurement with this method is analyzed and the photo-induced birefringence about $\Delta n \approx 0.005$ of azobenzene (AZO) polymer film is measured, which can achieve high sensitivity and high spatial resolution birefringence measurement.

Key words measurement; birefringence; azimuthally polarized beam; waveguide-mode resonance

OCIS codes 120.2130; 120.5410

1 引 言

双折射材料有着广泛的应用,如液晶显示器、光通信中的光隔离器、光波片和偏振态光学存储^[1]等;生物组织的双折射率性质可以表征其受烧灼损伤的情况^[2,3]。介质双折射率的传统测量方法有偏振光椭圆率测量仪或旋光计方法^[4~8],这种方法利用双折射样品对入射光偏振态的改变,通过测量照射样

品前后光线的偏振特性反推介质的双折射率。随着测量要求的提高,出现一种光学相干断层扫描双折射率测量方法^[9],这种仪器以迈克耳孙干涉仪为基础,通过样品反射光相位的变化测量双折射率,测量灵敏度高,但光路要求严格,单元像素面积较大。利用 Kretschmann 补偿入射光波矢的结构能激励波导模共振,共振峰对周围介质折射率变化非常敏感,

收稿日期: 2010-04-07; 收到修改稿日期: 2010-05-11

基金项目: 国家 973 计划(2006cb302905)、国家自然科学基金(60736037,10704070)和“中央高校基本科研业务费专项资金”资助课题。

作者简介: 阎 杰(1982—),男,博士研究生,主要从事近场光线与轴向偏振光等方面的研究。

E-mail: yanj@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 明 海(1947—),男,教授,主要从事近场光学方面的研究。E-mail: minghai@ustc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yhlu@ustc.edu.cn

本文电子版彩色效果详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

但 Kretschmann 结构只能在一维方向激励共振,而且空间分辨率较低。于是, H. Kano 等^[10,11]提出用高数值孔径的油浸物镜补偿入射光波矢的方法激励共振。物镜由于其结构的中心对称性,能在二维空间同时补偿入射光的波矢,且空间分辨率较高^[12]。利用光束截面上偏振态沿中心对称的径向偏振光^[13~16]作为物镜的照明光源,能在二维空间有效地激励共振。这时,物镜后焦面的傅里叶光谱图像是一个共振峰吸收圆环。后焦面上共振环半径对应于不同传播方向的表面波的传播常数,据此可以测量折射率微小的变化^[17]。如果样品的折射率分布是各向异性的,则可以直观的通过共振环形状的变化测量介质的双折射率^[18]。基于此,本文提出了一种新型的测量双折射率的方法,通过切向偏振光照明的泄漏辐射模显微镜激励导波膜共振测量介质双折射率,可以测量双折射率差很小的样品,并实现高空间分辨率的测量。

2 切向偏振光照明的泄漏辐射模显微镜测量双折射率的分析

在光束截面上不同位置处,切向偏振光的偏振方向不同,并始终沿光斑的切向对称分布,如图 1 所示。切向偏振光经物镜会聚照射到样品表面时,各个入射方向的光线都是 TE 偏振光。对于光轴方向平行于样品表面(x - y 平面,坐标如图 1 所示)的双折射介质,入射方向不同的 TE 偏振光将会受不同折射率的影响。对于 x - z 平面内的入射光,光线偏振方向与主平面垂直,入射光线是 o 光;对于 y - z 平面内的入射光,光线偏振方向在主平面内,入射光线

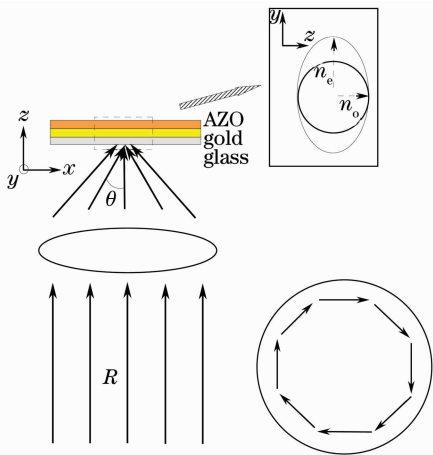


图 1 切向偏振光照明的情况

Fig. 1 Situation of focus with azimuthally polarized beam illumination

是 e 光。在这两个特殊平面之间的入射光线包含两种分量。由于会聚切向偏振光在不同入射方向上的光线偏振方向不同(但都是 TE 偏振),所以将切向偏振光会聚到单轴晶体表面,其反射光会感受到晶体折射率的各向异性。

经各向异性样品界面反射的光线通过物镜收集,其在物镜后焦面的傅里叶光谱信息可以反映样品折射率的各向异性(不同偏振方向下的单轴晶体折射率)。不同角度的入射光线将会在物镜后焦面上形成不同半径的圆环,圆环半径 R 和光线入射角之间满足如下关系: $R \propto \sin \theta$ ^[19]。如果样品的折射率是各向同性的,不同入射方向和偏振方向的光线感受到的折射率相同,共振吸收峰在后焦面上呈一个圆形的暗环。当样品的折射率为各向异性介质时,不同入射方向的光线将会受到不同折射率的影响,后焦面上的共振吸收环的形状会改变。如图 1 所示,假设薄膜的光学各向异性类似负单轴晶体,沿 y 方向的共振环半径将大于沿 x 方向的半径,从 x 方向与 y 方向的共振峰半径比中可以获得样品的双折射率信息。通过扫描样品,可以得到整个样品的双折射率分布。

实验中,选用偶氮聚合物(AZO)作为待测双折射介质。偶氮聚合物是一种新型的双功能光存储材料,其结构特征是在两个芳环之间以 $N=N$ 双键连接。偶氮聚合物具有光致双折射效应^[20],当偶氮基团吸收光后会发生反-顺-反周期性异构循环,基团沿着与光电场矢量垂直的方向取向,由此引起不同方向的折射率的不同。图 2 是使用的偶氮聚合物分子式结构,经光致双折射后, n_o 和 n_e 的折射率差 $\Delta n \approx 0.005$ ($n_o \approx 1.65$)^[21]。

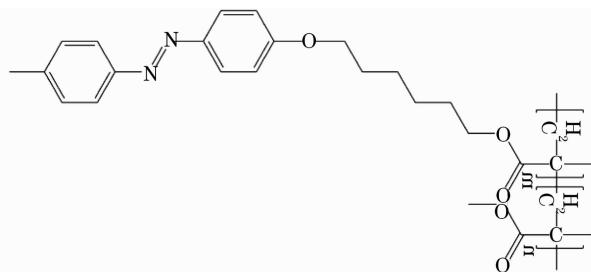


图 2 偶氮分子式结构

Fig. 2 Molecular formula of azobenzene

泄漏辐射模显微镜要激励金膜与介质层界面的表面等离子体共振,待测介质膜的厚度必须很薄。图 3(a)是用多层膜转移矩阵理论计算得到的双折射率差为 $\Delta n = 0.005$ 的表面等离子体共振的情况。样品结构如图 1 所示,在 45 nm 厚的金膜上覆盖

20 nm的偶氮膜,物镜与匹配液的折射率都为 $n \approx 1.516$ 。入射光波长为 633 nm,此时金的介电常数为 $\epsilon = -9.45822 + i1.14182^{[22]}$ 。计算结果显示,只有 TM 光才能激励表面等离子体共振。对于双折射率差只有 $\Delta n = 0.005$ 的双折射介质,物镜后焦面上对应于 n_o 和 n_e 的表面等离子体共振环不能被区分,达不到测量的灵敏度。

图 3(b)是泄漏辐射模显微镜激励双折射介质膜中波导模共振的情况。样品为 45 nm 厚的金膜上覆盖 120 nm 的偶氮膜。随着偶氮膜的增厚,介质层等效折射率增加并超出泄漏辐射模显微镜对折射率成像的范围(实验中的物镜能在介质层等效折射率 $n \leq 1.312$ 的范围内对折射率成像),泄漏辐射模显微镜将不能在金膜与介质层界面激励表面等离

子体共振,但仍然可以通过介质膜中的波导模共振测量介质的双折射率。此时,TE 的一阶波导模共振被激发,而 TM 的波导模共振尚未达到激发条件,所以只有 TE 光才能激励波导模共振。对于双折射率差只有 $\Delta n = 0.005$ 的双折射介质,对应于 n_o 和 n_e 的波导模共振峰已经能够分辨。这时,物镜后焦面上的波导模共振环在不同方向的半径不一样,不再是一个圆环。图 3(c)是玻璃衬底直接覆盖 120 nm 偶氮膜,没有金膜间隔的情况。已知波导的传播常数满足 $\beta > nk_o$,其中 n 是衬底折射率, k_o 为波数。偶氮膜与衬底之间没有金膜隔开时,经物镜折射的入射光线动量 $nk_o \sin \theta$ 小于波导的传播常数 β ,达不到激励波导模共振的条件,得不到波导模共振峰。

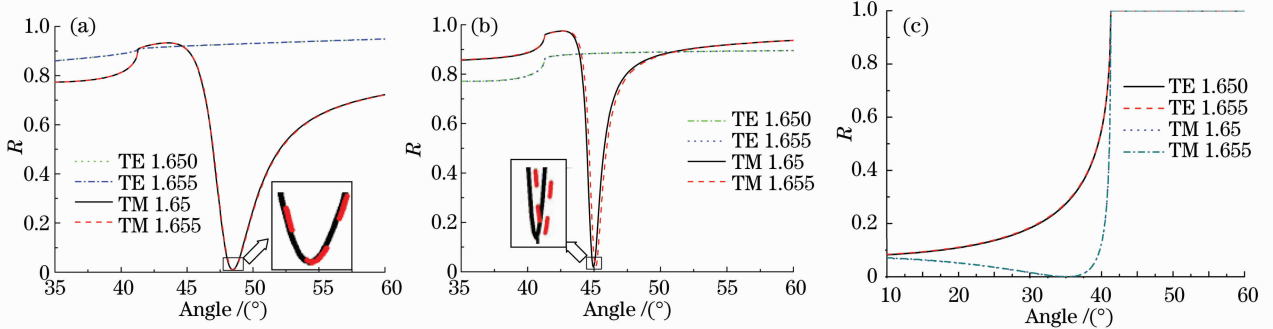


图 3 (a) 20 nm 厚偶氮膜激励表面等离子体的共振峰,(b) 120 nm 厚偶氮膜激励波导模共振峰,
(c) 没有金膜时,120 nm 厚偶氮膜的反射情况

Fig. 3 (a) Surface plasmon resonance with 20 nm AZO polymers, (b) waveguide mode resonance with 120 nm AZO polymers, (c) reflection situation of 120 nm AZO polymers without gold coating

3 双折射率的实验测量

测量装置如图 4 所示。切向偏振光由 632.8 nm 的圆偏振光依次通过切向偏振片(AA)与螺旋相位片(SPP)获得^[23]。透镜 L1($f = 2.5$ cm)和 L2($f = 40$ cm)组成的扩束系统将光束扩束到能覆盖整个物镜的入瞳面。入射光经油浸物镜(OLYMPUS 100X NA=1.45)会聚到样品表面,样品与物镜之间的间隔层用匹配油($n_o = 1.516$)填充。由物镜的数值孔径和匹配油的折射率,可以推导出通过物镜后最大的入射角为 73.03° 。样品表面的反射光通过同一物镜收集,由透镜 L3($f = 15$ cm)将物镜的后焦面成像于 CCD 光敏面,通过计算机采集可得到物镜后焦面的傅里叶光谱信息。

样品的结构如图 4 所示。标准盖玻片(厚度 0.17 mm)上用蒸镀的方法镀上 45 nm 的金膜,然后通过旋涂的方法在金膜表面覆上一层厚约 120 nm

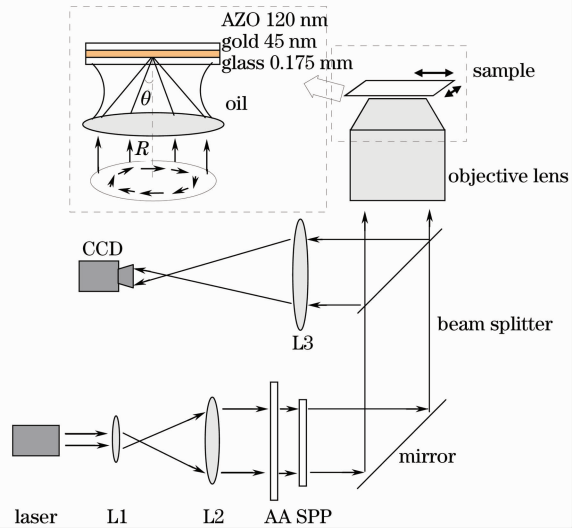


图 4 切向偏振光照明的泄漏辐射模显微镜装置图

Fig. 4 Experimental setup of leaky radiation-mode microscope with azimuthally polarized beam illumination

的偶氮聚合物薄膜。光致双折射前, CCD 采集到的物镜后焦面样品的傅里叶光谱信息如图 5(a)所示。图 5 中, 橙色圆环(虚线)是为了方便观察画出的参考圆环, 黑色暗环是由于入射光激励波导模共振吸收引起的, 暗环的半径对应波导模共振吸收峰的角

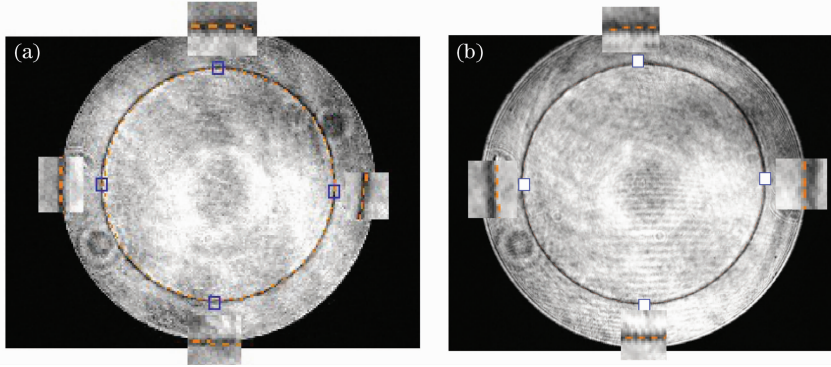


图 5 (a)光致双折射前与(b)光致双折射后,后焦面傅里叶光谱信息

Fig. 5 Spatial spectrum on Fourier plane (a) before and (b) after photo-induced birefringence

使用 488 nm 的平行线偏振光光束持续照明样品 10 min, 使偶氮聚合物发生光致双折射。光致双折射过程中, 确保照射光束是严格的平行光束, 并且样品表面垂直于照射光束的入射方向。这样, 在光致双折射过程中不会引起偶氮膜表面因光照而发生表面起伏, 确保测量的结果是由于光致双折射效应引起, 而不是由于样品表面起伏。

经过光致双折射处理后, 样品置于物镜前焦面, CCD 采集到的物镜后焦面样品的傅里叶光谱信息如图 5(b)所示。由图可见, 经过光致双折射取向后, CCD 采集到的物镜后焦面的波导模共振环沿 x 方向与沿 y 方向的半径不一样, 可从图中 4 个方向的暗环与标准橙色圆环(虚线)的对比得到。这是由于经 488 nm 线偏振光照射取向后, 偶氮聚合物薄膜具有双折射性质, 不同入射方向的切向偏振光光线受到不同折射率的影响, 得到的波导模共振峰角度不同, 造成不同方向的共振环半径不一样。

4 结 论

利用切向偏振光在光束截面上不同位置处偏振方向不同的特点, 结合物镜结构能够在二维空间补偿入射光波矢、激励波导模共振的特性, 提出了一种测量介质双折射率的方法, 并从理论上分析了这种测量方法的可行性。初步的实验结果证明, 利用切向偏振光照明的泄漏辐射模显微镜能够测量双折射率差很小的双折射样品。这种方法与成熟的显微扫描系统结合, 可快速扫描样品得到整个样品的双折

度。由局部放大图可见, 光致双折射前, 偶氮聚合物是折射率各向同性介质, 不同入射方向的光线受到的折射率相等, 后焦面的傅里叶光谱是一个圆形的波导模共振环。

射率分布。相信通过后续工作的深入研究与改进, 利用切向偏振光照明的泄漏辐射模显微镜有望成为一种测量双折射率的有用工具。

参 考 文 献

- 1 Wang Pei, Ming Hai, Liang Zhongchen *et al.*. Photoinduced birefringence and optical storage in AZO benzene side-chain polymer liquid crystal film [J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2002, **19**(4): 358~362
- 王 沛, 明 海, 梁忠诚. 偶氮侧链聚合物液晶薄膜光致双折射及其光存储实验 [J]. *量子电子学报*, 2002, **19**(4): 358~362
- 2 D. J. Maitland, J. T. Walsh. Quantitative measurements of linear birefringence during heating of native collagen [J]. *Laser Surg Med.*, 1997, **20**(3): 310~318
- 3 J. F. de Boer, T. E. Milner, M. J. C. vanGemert *et al.*. Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12): 934
- 4 B. L. Wang, T. C. Oakberg. A new instrument for measuring both the magnitude and angle of low level linear birefringence [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, **70**(10): 3847~3854
- 5 T. Sato, T. Araki, Y. Sasaki *et al.*. Compact ellipsometer employing a static polarimeter module with arrayed polarizer and wave-plate elements [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46** (22): 4963~4967
- 6 Justin Wolfe RC. High speed imaging polarimeter [C]. *SPIE*, 2003, **5158**: 24~32
- 7 Kong Fanmei, Li Guohua, Li Chunhong *et al.*. Study on the dispersion of birefringent indexes of mica crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3148~3151
- 孔凡美, 李国华, 李春红 等. 云母晶体双折射率色散特性的研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3148~3151
- 8 Kong Fanmei, Li Guohua, Song Lianke *et al.*. Measurement of thermal maximal birefringent index coefficients of mica crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1190~1194
- 孔凡美, 李国华, 宋连科 等. 云母晶体最大双折射率温度系数的测定 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1190~1194
- 9 J. M. Schmitt. Optical coherence tomography (OCT): a review

- [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 1999, **5**(4): 1205~1215
- 10 H. Kano, W. Knoll. A scanning microscope employing localized surface-plasmon-polaritons as a sensing probe [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**(1-3): 11~15
- 11 H. Kano. Excitation of surface plasmon polaritons by a focused laser beam [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**: 1381~1386
- 12 K. Watanabe, N. Horiguchi, H. Kano. Optimized measurement probe of the localized surface plasmon microscope by using radially polarized illumination [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 4985~4990
- 13 Q. Zhan. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, **1**: 51~57
- 14 J. Yan, Y. H. Lu, P. Wang *et al.*. Improving the sensitivity of fiber-optic SPR sensor via radially polarized beam excitation [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 909~911
- 15 Lin Huichuan, Liu Hui, Pu Jixiong. Extra cavity coherent superposition for generation of radially polarized beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 251~256
林惠川, 刘 辉, 蒲继雄. 腔外相干叠加产生径向偏振光[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 251~256
- 16 Huang Jintang, Wei Wei, Zhang Yuan *et al.*. Generation of cylindrical vector beams by use of C-cut YVO₄ crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 557~561
- 黄金堂, 韦 玮, 张 源等. 利用C切钽酸钷晶体产生轴对称偏振光[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 557~561
- 17 D. G. Zhang, X. C. Yuan, A. Bouhelier *et al.*. Active control of surface plasmon polaritons by optical isomerization of an azobenzene polymer film [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **26**(95): 101~102
- 18 T. Tanaka, S. Kawata. Real-time observation of birefringence by laser-scanning surface plasmon resonance microscope [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 6905~6911
- 19 E. Wolf BR. Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system [C]. Proc. Royal Society of London, Series A, 1959
- 20 T. Todorov NT, L. Nikolova. High-sensitivity material with reversible photo-induced anisotropy [J]. *Opt. Commun.*, 1983, **47**(22): 123~126
- 21 Y. L. Wu, T. Ikeda, Q. J. Zhang. Three-dimensional manipulation of an azo polymer liquid crystal with unpolarized light [J]. *Advanced Materials*, 1999, **11**(4): 300~302
- 22 P. B. Johnson, R. W. Christy. Optical constants of the noble metals [J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **6**: 4370~4379
- 23 K. J. Moh, X. C. Yuan, J. Bu *et al.*. Generating radial or azimuthal polarization by axial sampling of circularly polarized vortex beams [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(30): 7544~7551