

光盘盘基应力双折射的研究

朱 莉 李锡善

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

边大安

赵如宝

(济宁师专物理系, 272125) (北京理工大学应用物理系, 北京 100081)

摘 要 从理论和实验上讨论了光盘盘基在不同入射角光束通过时所产生的相位延迟值的改变。用起偏器-调制器-补偿器-样品-检偏器(PMCSA)结构形式的偏振相位调制方法对玻璃和聚碳酸酯(PC)两种材料光盘盘基进行测量, 结果表明聚碳酸酯盘基的双折射远大于玻璃盘基的双折射。

关键词 应力双折射, 光盘盘基。

1 引 言

光盘存储技术是近二十年发展起来的新兴的信息存储手段, 已在声视领域、计算机外部存储和多媒体应用上得到很快发展, 人们期望进一步发展实现短波长高密度存储目标。应力双折射率作为目前光盘盘基中存在的一个重要问题, 直接对光盘信号构成不利影响。双折射的存在使物镜会聚光束的不同部分聚焦在光盘记录层不同点处, 使标称焦点产生畸变, 这种畸变对读/写光束的聚焦可产生严重不利影响, 从而使光盘性能变坏。而且, 随着短波长化应用趋势的日渐增强, 这种影响将变得更为重要。

一般说来, 光盘盘基存在两类双折射, 即面内双折射和垂直双折射。双折射越大, 入射光束两个偏振态引起的相位延迟也越大, 因此对系统的影响也越严重。在透镜数值孔径较大情况下, 较多光束相对于光盘有较大入射角度, 因此垂直双折射将有较大影响。

2 理论分析

由于材料本身的性能, 或在盘基制造过程中各种工艺因素的影响, 盘基受到应力作用而表现出光学各向异性。考察有应力材料上任一点的光学性质时, 可以发现, 不论其应力状态如何, 应力椭球体与折射率椭球体之间有着直接的关系。材料中此点附近的一个单元体, 其表现犹如正交晶系的晶体, 其光学特性可用一折射率椭球体来表示, 如图1所示, 令 n_1 、 n_2 和 n_3 分别代表平行于主轴方向振动的光波的主折射率。

对盘基双折射的测量可作某些假设: 主折射率 n_3 的轴与盘基表面垂直(z), 其它主折射率 n_1 、 n_2 的轴与盘基表面平行(x , y)。

在上述分析的基础上, 考察在 yoz 平面内, 与 z 轴成 i 角的任意入射方向, 盘基双折射与 n_1 、 n_2 、 n_3 及入射角 i 的关系。

当平面波倾斜入射到样品上, 光波被分解为寻常光(o光)和非常光(e光), 其在样品内传播(如图 2 所示)。寻常光与非常光从样品中出射后具有相位延迟 δ

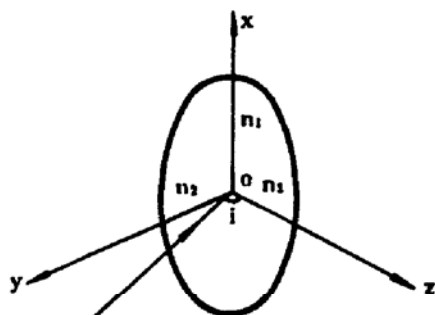


Fig. 1 The ellipsoid of refraction index in the stress field

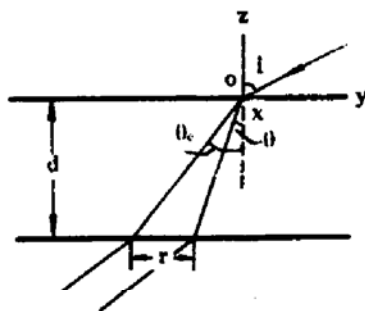


Fig. 2 Determination of the phase difference between two waves transmitted by a crystal plate

$$\delta = kd[n_o \cos \theta_o - n_e \cos \theta_e] \quad (1)$$

入射面在 yoz 平面内, 与 ox 轴垂直, 可以很容易理解, 寻常光的折射率为 n_1 , 即 $n_o = n_1$, 满足折射定律:

$$\sin i = n_o \sin \theta_o \quad (2)$$

因之

$$n_o \cos \theta_o = \sqrt{n_1^2 - \sin^2 i} \quad (3)$$

对于非常光

$$\sin i = n_e \sin \theta_e \quad (4)$$

利用晶体光学理论, 单色平面波在晶体中传播时, 光波折射率 n 与光波法线 k_0 之间满足菲涅耳方程(如图 3)

$$\frac{k_{0x}^2}{1/n^2 - 1/n_x^2} + \frac{k_{0y}^2}{1/n^2 - 1/n_y^2} + \frac{k_{0z}^2}{1/n^2 - 1/n_z^2} = 0 \quad (5)$$

$$k_{0x} = 0, \quad k_{0y} = \sin \theta_e, \quad k_{0z} = \cos \theta_e \quad (6)$$

根据假设:

$$n_x = n_1, \quad n_y = n_2, \quad n_z = n_3 \quad (7)$$

将(6)式和(7)式代入(5)式, 并令 $n = n_e$ 。然后将计算结果与(4)式联系起来, 得到

$$n_e \cos \theta_e = (n_2/n_3) \sqrt{n_3^2 - \sin^2 i} \quad (8)$$

将(3)式和(8)式代入(1)式, 即可得到

$$\delta = kd[\sqrt{n_1^2 - \sin^2 i} - (n_2/n_3) \sqrt{n_3^2 - \sin^2 i}] \quad (9)$$

上式即为光盘盘基相位延迟的解析表达式, 该解析式给出了相位延迟与入射角 i 的关系并与折射率 n_1 、 n_2 和 n_3 成显式关系。

应力双折射由折射率之间的差值决定: 面内双折射: $\Delta n_{\text{面内}} = n_1 - n_2$; 垂直双折射: $\Delta n_{\text{垂直}} = (n_1 + n_2)/2 - n_3$ 。

下面, 讨论光盘盘基存在应力双折射率时, 对光头物镜会聚光束聚焦性能的影响。

图 4 所示是光盘系统光学读/写头中物镜会聚光路示意图。当光盘盘基存在应力双折射, 光束通过盘基聚焦时将会产生额外的像差, 会聚光斑是一弥散斑, 由图 2 可以看出, 弥散斑

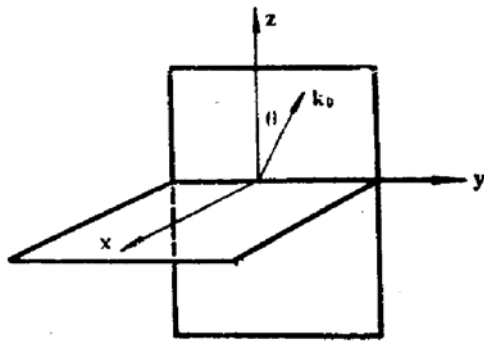


Fig. 3 Construction for the directions of wavefront K_0 in a uniaxial crystal

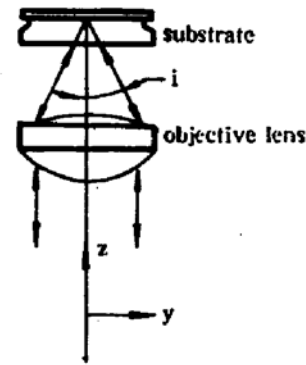


Fig. 4 Optical path between the disk and objective lens

的大小 r 由下式给出

$$r = d(\tan \theta_e - \tan \theta_0) \quad (10)$$

根据前面分析的结果, 将 $\tan \theta_e$ 和 $\tan \theta_0$ 分别表示为入射角 i 以及 n_1 、 n_2 和 n_3 的函数, 上式变成

$$r = d \left[\frac{n_3}{n_2} \cdot \frac{\sin i}{\sqrt{n_3^2 - \sin^2 i}} - \frac{\sin i}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 i}} \right] \quad (11)$$

从(11)式可见, 由于存在双折射, $n_1 \neq n_2 \neq n_3$, 聚焦光斑将是一个与 n_1 、 n_2 和 n_3 有关的弥散斑。

人们讨论了由面内和垂直双折射引起的噪声电平的增大。Challener 等人计算了面内双折射对信号质量的影响, 指出面内双折射引起差动探测系统的不平衡, 使系统的噪声抑制能力变弱。Takahashi 等人计算了垂直双折射率的影响, 由于垂直双折射改变了光束椭圆度, 进入探测器的信号偏值增大。由于信号偏值与光路成正比, 因此使激光噪声和光盘噪声增大。尽管光头的差动探测系统可以用来防止垂直双折射效应, 但其对信号质量还是有些影响。Prikryl 进一步讨论了盘基双折射对光盘差动信号幅度、信噪比以及信号质量的影响。认为虽然垂直双折射降低了信号幅度, 但并不一定增大噪声。有时, 依赖其它系统参数, 噪声甚至可能降低。

3 实 验

构思是: 通过对样品相位延迟的检测, 如果把不同折射率时相位延迟与角度关系联系起来,

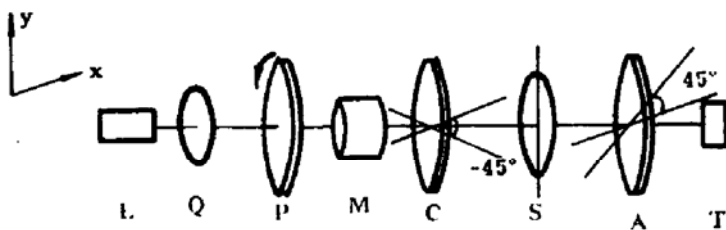


Fig. 5 Schematic diagram of the principle of the system, polarizer-modulation-compensator-specimen-analyzer (PMCSA) form

旋光调制器的作用是对偏振光的偏振方向进行调制。

便可确定双折射。相位延迟的检测采用偏振调制测量方法, 图 5 所示的是 PMCSA 布局测试系统原理图。其补偿器选用四分之一波片, 方位角 $C = -45^\circ$, 样品的应力主轴与 Y 轴重合, 检偏器的方位角 A 设定为 45° , 起偏器可以旋转, 法拉第磁光

运用琼斯(Jones)矩阵对系统进行分析,起偏器 P 输出线偏振光琼斯矩阵以 E_i 表示

$$E_i = \begin{vmatrix} \cos P \\ \sin P \end{vmatrix} \quad (12)$$

后续各偏振元件的琼斯矩阵分别如下:

$$M \quad J_M = \begin{vmatrix} \cos M & \sin M \\ -\sin M & \cos M \end{vmatrix} \quad (13)$$

$M = M_0 \sin \omega t$ 是磁光调制器法拉第旋转角, ω 为调制频率

$$C \quad J_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$S \quad J_s = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{vmatrix} \quad (15)$$

δ : 待测样品相位延迟

$$A \quad J_A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (16)$$

式中 δ 为待测样品的相位延迟。用合成琼斯矩阵来描述顺序分布在光路上的一系列元件的总效应,投射到探测器上的检偏器输出光波的琼斯矢量 E_0 与 E_i 的关系为

$$E_0 = J_A J_s J_c J_M E_i$$

$$E_0 = \begin{vmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{vmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{vmatrix} \exp(i\beta) + \exp[i(\pi/2 - \beta + \delta)] \\ \exp(i\beta) + \exp[iu(\pi/2 - \beta + \delta)] \end{vmatrix} \quad (17)$$

式中:

$$\beta = P - M \quad (18)$$

如果光电探测器的响应是投射其上总光流的线性函数,则其输出将与检偏器出射光强度成正比,偏振光的强度 I 可简单地表达成沿两个相互垂直方向的振动分量的振幅平方和,待测信号由下式给出

$$I = I_0(|E_{0x}|^2 + |E_{0y}|^2) = I_0(E_{0x}^* E_{0x} + E_{0y}^* E_{0y})$$

将(17)式中有关值代入并化简,得到:

$$I = I_0 \cos^2(P - \delta/2 - \pi/4 - M) \quad (19)$$

式中, I_0 代表系统的平均输出光强。(19)式表明,光电探测器记录下的检测信号是起偏器旋转角度 P 和样品相位延迟 δ 的函数,并被磁光调制交流调制。显然,由于交变磁场引起的法拉第旋转使输出光的磁光调制幅度为:

$$I_0 \cos^2(P - \delta/2 - \pi/4 - M_0) - I_0 \cos^2(P - \delta/2 - \pi/4 + M_0)$$

$$= I_0 \sin(2P - \delta - \pi/2) \sin 2M_0 \quad (20)$$

当 M_0 为定值时,磁光调制幅度随 2α (令 $2\alpha = 2P - \delta - \pi/2$) 的变化。

(1) $\alpha = 45^\circ$ 时,磁光调制幅度最大[如图 6(a)所示],此时由(19)式得

$$I = (I_0/2) \sin 2M \quad (21)$$

(2) 当 $\alpha \neq 45^\circ$ 时, I 与 α 的变化有关,因此调制波形及其幅度随起偏器透光轴方位角以及

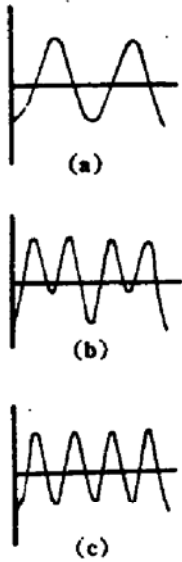


Fig. 6 Modulating waveform

样品相位延迟量而变化, $M_0 < 45^\circ$, 将会引起调制波形的畸变[如图 6(b)所示]。

旋转起偏器, 当 $\alpha = -\pi/2$ 时, 输出光强为

$$I = (I_0/2) \cos 2M \tag{22}$$

此时, I_2 为 M 的偶函数, 显然, 输出调制信号的频率是输入调制信号频率的二倍[如图 6(c)所示]。

相位检测就依据下述事实: 旋转起偏器(这同时意味差 α 的改变)直到探测光电流在调制频率 ω 处的分量变零(此时只有二倍频分量)为止。这种情况下, 使光电流的基频为零的起偏器的方位角, 就决定了样品的相位延迟。

$$\delta = 2P + \pi/2 \tag{23}$$

在文献[9]中, 作者对这种形式的测试系统进行了全面的精度分析, 考察了各种误差因素对最后测试结果的影响。

4 结 论

用图 5 所示的装置对玻璃和 PC 两种材料的光盘盘基进行检测, 精度可达到单通推迟 0.03 nm, 重复测量误差小于 2%。

图 7(a)、图 7(b)所示分别对应玻璃和 PC 盘基上一点在不同入射角下的相位延迟曲线, 对测试结果进行分析, 可以看出:

- (1) 曲线对零度入射角对称, 意味着 n_s 轴与盘基表面垂直, 证明了解析表达式假设的正确性;
- (2) 就双折射而言, PC 和玻璃盘基比较, PC 盘基的双折射比玻璃盘基的双折射要大得多;
- (3) 利用上述方法得到的结果, 玻璃盘基的面内双折射 $\Delta n_{\text{面内}}$ 和垂直双折射 $\Delta n_{\text{垂直}}$ 分别为 -0.23×10^{-6} 和 7.2×10^{-6} , PC 盘基的面内双折射 $\Delta n_{\text{面内}}$ 和垂直双折射 $\Delta n_{\text{垂直}}$ 分别为 -10.3×10^{-6} 和 4612×10^{-6} 。这里, 垂直双折射的值对应于入射角 $i = 30^\circ$ 。

图 8(a), 图 8(b)表示沿半径方向, 距离中心不同位置处的相位延迟分布图(入射角 $i = 0^\circ$), 从图中可以清楚看出, 这种分布显得很复杂, 没有什么规律性。

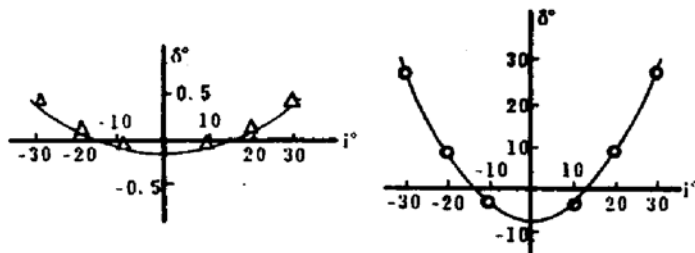


Fig. 7 Dependence of retardation on the incident angle

(a) the glass substrate, (b) the PC substrate

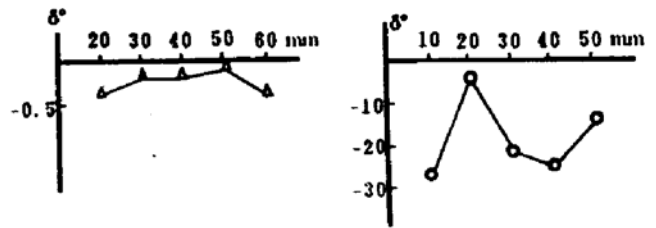


Fig. 8 Birefringence distribution along the radius

(a) the glass substrate, (b) the PC substrate

需要指出的是, 上述理论分析及实验是基于光盘盘基处于平面应力状态的假设, 也就是说, 在此种状态下, 可以认为盘基内的主应力沿整个厚度是常量, 而垂直于盘基平面的主应

力处处为零，盘基的表现犹如双轴晶体。

致谢：感谢光盘联合实验室的徐文东同志在实验中所提供的大力帮助。

参 考 文 献

- [1] W. A. Challener, T. A. Rinehart, Jones matrix analysis of magneto-optical media and read-back system. *Appl. Opt.*, 1987, 18(26) : 3974
- [2] A. Takahashi, M. Mieda, Y. Murakami, et al., Influence of birefringence on the signal quality of magneto-optic disks using polycarbonate substrate. *Appl. Opt.*, 1988, 27(14) : 2863
- [3] I. Prikryl, Effect of disk birefringence on a differential magneto-optic readout. *Appl. Opt.*, 1992, 31(31) : 1853
- [4] A. Skumanich, Substrate birefringence in coated optical storage disks. *Opt. Lett.*, 1993, 18(2) : 155
- [5] R. M. A. Azzam, N. M. Bashara, (梁民基等译), 椭圆偏振测量术和偏振光. 北京, 科学出版社, 1986
- [6] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*. New York, London, Pergamon Press Ltd., 1964
- [7] C. F. Wong, Birefringence measurement using a photo elastic modulator. *Appl. Opt.*, 1979, 18(23) : 3996
- [8] S. J. Williamson, J. M. Weingartf, New high-precision photoelectric universal polarimeter and birefringence compensator. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, 54(3) : 337
- [9] 朱 莉, 李锡善, 徐文东, 用相位调制方法测量光盘盘基应力双折射的精度分析. *光学学报*, 1995, 15(9) : 1258~1265

The Study of the Stress Birefringence in the Optical-Disk Substrate

Zhu Li Li Xishan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Bian Daan

(Department of Physics, Jinning Teachers College, Jinning 272125)

Zhao Rubao

(Department of Applied Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081)

(Received 26 January 1995; revised 17 July 1995)

Abstract The phase retardation of a ray with various incident angle transmitted through a optical-disk substrate was investigated on the theory, as well as the experiment, Birefringence of the PC and glass disk substrates was measured by using the polarized phase modulation method which be in PMCSA form.

Key words stress birefringence, optical-disk substrate.