

文章编号: 1001-3806(2008)02-0157-02

菱体型相位延迟器对入射角灵敏性的研究

李国良^{1,2}, 宋连科^{2*}, 郝殿中², 周文平², 范开敏³

(1. 黔西南民族师范高等专科学校 物理系, 兴义 562400 2 曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165 3 西华师范大学 物理与电子信息学院, 南充 637002)

摘要: 为了清楚地了解菱体型消色差 $\lambda/4$ 相位延迟器对入射角 i 变化的灵敏性随折射率 n 变化的规律, 利用全反射相变公式详细推导出器件对入射角 i 变化的灵敏性与折射率 n 的关系式, 并做出了理论曲线。可见, 随着折射率 n 的增加, 器件对入射角 i 的变化更加灵敏。结果表明, 设计器件时应尽量避免选择高折射率材料。在分析相位延迟量的测量误差时, 这个应用也是很有价值的。

关键词: 光学器件; 消色差; 全反射; 折射率

中图分类号: TH744.2 文献标识码: A

Sensitivity of rhomb-type phase retarders to the input angle

LI Guo-liang^{1,2}, SONG Lian-ke², HAO Dian-zhong², ZHOU Wen-ping², FAN Kai-min³

(1. Department of Physics, Southwest Guizhou Teachers College of Nationalities, Xingyi 562400, China 2. Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China 3. School of Physics and Electronic Information, China West Normal University, Nanchong 637002, China)

Abstract In order clearly to learn the regularity that sensitivity to variations in the input angle of incidence i of a rhomb-type achromatic quarter wave phase retarder vary with refractive index n , the total reflection phase transformation formula are used to deduce the transmissivity formula of sensitivity to variations in the input angle of incidence i of retarders and refractive index n and draw the theoretical curves. The result indicates that retarders are more sensitive to variations in the input angle of incidence i with refractive index increasing. So the higher refractive index material should be avoided in designing retarders. This application is advantageous in analyzing error in phase retardance measurement.

Key words optical device; achromatism; total reflection; refractive index

引 言

相位延迟器是产生相位延迟的光学器件^[1], 它有着广泛地应用。在光频隔离器和激光实验中, 为了把线性偏振光转化为圆偏振光用到了 $\lambda/4$ 相位延迟器, 相位延迟器在椭圆偏振光的分析中也有着重要的应用。相位延迟器依靠 3 种光学现象, 即双折射^[2-5], 全内反射^[6,7] 和外反射。在这些器件中, 全内反射相位延迟器因延迟量对波长的依赖较弱, 因而在精密测量中是首选。长方体型消色差相位延迟器具有很高的消色差精度, 文献 [6] 中所设计的这种器件在 632.8nm ~ 1150nm 光谱区域内, 任何一点延迟量偏离 90° 最大仅为 0.007° 。虽然此器件具有很高的消色差精度, 但由于在使用时对入射角的变化比较灵敏, 因此, 找出器件对入

射角变化的灵敏性与折射率的关系, 从而使用对入射角变化不灵敏的材料来设计器件显得比较重要。

1 相位延迟 δ 与材料折射率 n 及全内反射角 θ 的关系

一束光水平地射向一个如图 1 所示的长方体型延迟器件的入射面上, 光束的入射角 $i > \theta$ 在入射面处被

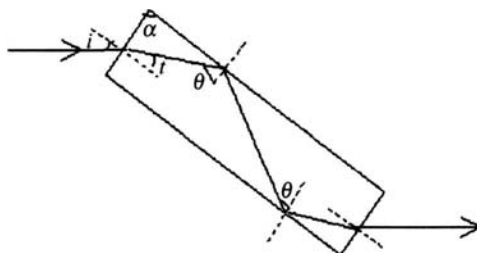


Fig 1 Optical path in the rectangular parallelepiped phase retarder. 由光通过介质折射面时的折射定律, 折射角 t 可由右式所示:

$$t = \sin^{-1}(\sin i/n) \quad (1)$$

由几何关系, 全内反射角 θ 如下式所示:

$$\theta = \alpha - \sin^{-1}(\sin i/n) \quad (2)$$

作者简介: 李国良 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学器件方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lksong@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2007-02-05; 收到修改稿日期: 2007-04-11

式中, α 是入射面和第 1 个折射面的夹角, t 是第 1 次发生折射时的折射角。

由于入射光在长方体型延迟器件中发生两次全内反射, 其总的相位延迟 δ 与全内反射角和折射率的关系如下式^[8-9]所示:

$$\delta = 4 \tan^{-1} [\cos \theta (n^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2} / n \sin^2 \theta] \quad (3)$$

式中, λ 是入射光的波长, 一般情况下斜入射时相位延迟量由上式表示, 正常入射时也可以用上式来表示, 但此时全内反射角 θ 是不依赖折射率 n 的常量。

2 δ 对 i 变化的灵敏性

在长方体型消色差 $\lambda/4$ 相位延迟器中, 为了求出延迟量 δ 对入射角 i 变化的灵敏性与折射率 n 的关系式, 由 (3) 式 δ 对 i 求导可得:

$$d\delta/di = (\partial\delta/\partial\theta) (\partial\theta/\partial i) \quad (4)$$

由 (3) 式 δ 对 θ 求导可得:

$$\partial\delta/\partial\theta = 2n \sin\theta [\cos^2\theta - (n^2 \sin^2\theta - 1)] / [(n^2 \sin^2\theta - \cos^2\theta)(n^2 \sin^2\theta - 1)^{1/2}] \quad (5)$$

由 (2) 式, θ 对 i 求导可得:

$$\partial\theta/\partial i = -\cos i / n \cos t \quad (6)$$

将 (5) 式、(6) 式代入 (4) 式整理可得:

$$d\delta/di = -4 \sin\theta \cos i [\cos^2\theta - n^2 \sin^2\theta + 1] / \cos t (n^2 \sin^2\theta - \cos^2\theta)(n^2 \sin^2\theta - 1)^{1/2} \quad (7)$$

上式就是器件对入射角 i 变化的灵敏性与折射率 n 的关系式, 下面来求 $\lambda/4$ 相位延迟器完全消色差时某一折射率 n 所对应 θ i t 的值。

对于消色差 $\lambda/4$ 相位延迟器, 可由 (3) 式解出某一折射率 n 所对应 θ 的值。(3) 式有两个解, 但由于较大的全内反射角 θ 的选择有利于改善延迟器件的消色差性^[10], 因此, 应选择较大的 θ 由 (3) 式对 θ 求解可得:

$$\theta = \sin^{-1} [(n^2 + 1) + (n^4 - 4n^2 C^2 - 2n^2 + 1)^{1/2}] / 2n^2 (C^2 + 1)^{1/2} \quad (8)$$

$C = \tan(\delta/4)$, 其中相位延迟量 $\delta = 90^\circ$, 上式给出了消色差 $\lambda/4$ 相位延迟器某一折射率 n 所对应 θ 的值。

当器件在某一折射率 n 处完全消色差时, 有关系式 $d\delta/dn = 0$ 为求出 $d\delta/dn$ 的表达式, 由 (3) 式 δ 对 n 求导可得:

$$d\delta/dn = (\partial\delta/\partial n) + (\partial\delta/\partial\theta) (d\theta/dn) \quad (9)$$

($d\delta/dn$) 为延迟量 δ 对折射率 n 的变化率。只要上式等于 0 即由于波长 λ 的变化所导致折射率 n 的变化对延迟量 δ 几乎没有影响, 也就说明延迟器件具有良好的消色差性, 从而达到消色差的目的。

由 (3) 式, δ 对 n 求导可得:

$$\partial\delta/\partial n = 2 \sin^2 \theta \cos \theta /$$

$$(n^2 \sin^2 \theta - \cos^2 \theta)(n^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2} \quad (10)$$

折射率 n 的变化引起全内反射角 θ 的变化, 由 (2) 式 θ 对 n 求导可得 $d\theta/dn$ 的关系如下式所示:

$$d\theta/dn = \sin i / [n(n^2 - \sin^2 i)^{1/2}] \quad (11)$$

将 (5) 式、(10) 式、(11) 式代入 (9) 式, 并令其为 0 即 $d\delta/dn = 0$ 整理可得入射角 i 的关系式如下式所示:

$$i = \sin^{-1} \{ n^2 \sin^2 2\theta / \sin^2 2\theta + 4[(n^2 + 1) \sin^2 \theta - 2]^2 \}^{1/2} \quad (12)$$

(12) 式给出器件完全消色差 (即 $d\delta/dn = 0$) 时 i 与 θ n 的关系式。考虑到此器件发生全内反射产生的延迟量为 $\pi/2$ 时 θ 与 n 的关系, 由 (12) 式可以求出 $n > 1.585$ 即当 $n \leq 1.585$ 时, 没有满足使得器件发生两次全反射时延迟量为 $\pi/2$ 的值。将 (12) 式求出的入射角 i 代入 (1) 式, 便可求出某一折射率 n 所对应的折射角 t 。

将 θ i t 的值代入 (7) 式, 便可以做出延迟量 δ 对入射角 i 变化的灵敏性 $d\delta/di$ 与折射率 n 的关系式的理论曲线, 曲线如图 2 所示。

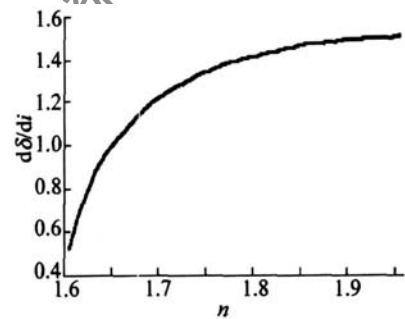


Fig 2 Variation of $d\delta/di$ with refractive index n

对曲线分析可以看出:

(1) $d\delta/di > 0$ 即入射角 i 与延迟量 δ 的变化相一致, 延迟量 δ 随入射角 i 的增大而增大。

(2) 随着折射率 n 的增加 $d\delta/di$ 变大, 这表明器件对入射角 i 的变化更加灵敏。举例说明, 当 $n = 1.60$ 时, $d\delta/di = 0.525$ 然而当 $n = 1.70$ 时, $d\delta/di = 1.076$ 材料折射率 n 仅增加 0.1, 器件对于 i 变化的灵敏性却增加 2 倍多, 文献 [6] 中所设计的长方体型延迟器件, 在 $n = 1.646$ 和 $n = 1.629$ 之间任何一点延迟量偏离 90° 的理论值最大为 0.007° 。但由以上分析可知, 仅仅由于入射光束的微小偏离, 获得如此高的精度也是很困难地, 因此, 器件设计时应尽量选择低折射率的材料。当然, 折射率也不是越小越好, 由于器件的尺寸随着折射率的增加而变小, 因此, 为了避免器件过大, 折射率 n 不能太小, 一般应该满足 $n \geq 1.68$ 。

3 结 论

总之, 通过详细推导得出器件对入射角 i 变化的灵敏性与折射率 n 的关系式, 可以得到不同材料的折

(下转第 162 页)

对于图 5 的仿真实验结果,即使不修改任何系统参数,当离焦量 w 被控制在 150 倍波长范围内时,成像中的相移总是很小。若对成像位置要求不高,此时的相移可以忽略不计。而这种情况下系统景深也已经达到同等条件下普通衍射受限 CCD 成像系统的 10 倍左右。即对景深放大倍数要求的降低意味着相移足够小的较好成像。

此外, (9) 式反映出提高三次方位相板的系数 α 也能在一定程度上抑制相移。图 6 中给出了 200 倍波

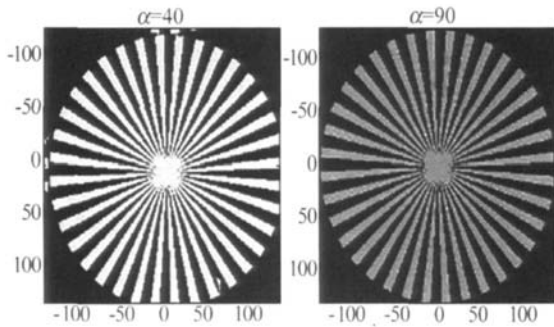


Fig 6 Phase shift with different constant alpha

长离焦情况下,采用不同 α 值得到的成像。当 $\alpha = 40$ 时,图像中有显著的相移。其它条件不变,将 α 提高到 90 此时成像相移则不再明显。因此也可以说较大的 α 值能直接降低大景深成像系统对离焦量的敏感度。但大的 α 值同时意味着加工的难度增加^[11-12],因此实际应用时,应当根据所需景深的大小合理选择 α 。

5 结 论

探讨了三次方位相板在大景深 CCD 衍射受限系统中的作用。位相板在增大景深的同时也引起了成像的相移,这种相移现象跟离焦参数 w 有密切关系,因此很难完全去除。但在一定的离焦范围内相移基本可

以忽略,即限制景深放大倍数可以控制相移的大小。同时合理选择三次方位相板的系数 α 也能有效限制相移的大小。在实际应用中可以考虑需要,合理选择景深大小和 α 值就能获得满意的成像效果。

参 考 文 献

- [1] WELFORD W T. Use of annular apertures to increase focal depth [J]. Journal of the Optical society of America, 1960, 50 (8): 749-753.
 - [2] LIU P Sh, LÜ B D. Boundary diffraction wave theory of plane waves diffracted at an annular aperture [J]. Laser Technology, 2006, 36 (1): 110-112 (in Chinese).
 - [3] WALDKIRCH M V, LUKOW IZ P, TROESTER G M. Multiple imaging technique for extending depth of focus in retinal displays [J]. Optics Express, 2004, 12 (25): 6350-6365.
 - [4] DOWSKIE R, JR, CATHEY W T. Extended depth of field through wavefront coding [J]. Appl Opt, 1995, 34 (11): 1859-1866.
 - [5] KUBALA K, DOWSKIE R, CATHEY W T. Reducing complexity in computational imaging systems [J]. Optics Express, 2003, 11 (18): 2102-2108.
 - [6] SOMAYAJIM, CHRISTENSEN M P. Enhancing form factor and light collection of multiplex imaging system by using a cubic phase mask [J]. Appl Opt, 2006, 45 (13): 2911-2923.
 - [7] GRACHT J V, EULISS J W. Information-optimized extended depth-of-field imaging system [J]. Proc SPIE, 2001, 4388: 103-112.
 - [8] CATHEY W T, DOWSKIE R. New paradigm for imaging system [J]. Appl Opt, 2002, 41 (29): 6080-6092.
 - [9] SHERIF S S, DOWSKIE R, CATHEY W T. Effect of detector noise in incoherent hybrid imaging systems [J]. Opt Lett, 2005, 30 (10): 566-568.
 - [10] DOWSKIE R, JOHNSON G E. Wavefront coding: a modern method of achieving high performance and/or low cost imaging systems [J]. Proc SPIE, 1999, 3779: 137-145.
 - [11] HELLMUTH T, BICH A, BÖRRETT R, et al. Variable phase plates for focus invariant optics [J]. Proc SPIE, 2005, 5962: 15-25.
 - [12] TIAN J Y, GONG M L, YAN P, et al. The design of biconvex spherical single objective lens with numerical aperture of 0.85 [J]. Laser Technology, 2005, 29 (2): 116-118 (in Chinese).
-
- (上接第 158 页)
 - 射率 n 所对应的 $d\delta/di$ 值。随着折射率 n 的增加,器件对入射角 i 的变化更加灵敏。因此,在长方体型相位延迟器的设计中,不但要努力提高器件的消色差精度,而且应降低器件对入射角的灵敏性,这就需要在设计器件时应尽量避免选择高折射率材料。在分析相位延迟的测量误差时,这个应用也是很有价值的。
 - 参 考 文 献
 - [1] LI J Z. Optical handbook [M]. Xi'an Science and Technology Press of Shanxi, 1986: 576-580 (in Chinese).
 - [2] CHUN Y. Construction of an optical rotator using quarter-wave plates and optical retarder [J]. Opt Engng, 1995, 34 (10): 3031-3035.
 - [3] XUE G D, FENG L, JIAN J W, et al. Achromatic wave plates for optical pickup units fabricated by use of in-print lithography [J]. Opt Lett, 2005, 30 (19): 2614-2616.
 - [4] JEAN-BAPTISTE M, GUILHEM G. Terahertz achromatic quarter-wave plate [J]. Opt Lett, 2006, 31 (9): 265-267.
 - [5] MCINTYRE C M, HARRIS S E. Achromatic wave plates for visible spectrum [J]. JOSA, 1968, 58 (12): 1575-1580.
 - [6] NAGIB N N. Theory of oblique incidence phase retarders [J]. Appl Opt, 1997, 36 (7): 1547-1552.
 - [7] ZHAO P T, LI G H, WU F Q. New design of high precision achromatic phase retarder [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25 (7): 980-983 (in Chinese).
 - [8] NAGIB N N. Phase retarders with variable angles of total internal reflection [J]. Appl Opt, 1994, 33 (7): 1218-1222.
 - [9] NAGIB N N. Phase retarders highly insensitive to the input angle [J]. Appl Opt, 1998, 37 (7): 1231-1235.
 - [10] LI G L, SONG L K, HAO D Z, et al. Optimal design of half-type achromatic retarder [J]. Laser Technology, 2005, 30 (5): 539-540 (in Chinese).