

文章编号: 1001-3806(2011)02-0275-03

高精度菱体型消色差延迟器的优化设计

李国良¹, 宋连科², 范开敏³

(1. 兴义民族师范学院 物理系, 兴义 562400; 2. 曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165; 3. 四川文理学院 物理与工程技术系, 达州 635000)

摘要: 为了提高菱体型消色差 $\lambda/4$ 相位延迟器的精度, 采用使 $\lambda/4$ 相位延迟器的延迟误差为正负偏差和在设计时选择较大的折射率的方法, 对延迟器件进行了理论分析和实验验证, 取得了设计高精度 $\lambda/4$ 相位延迟器的数据。结果表明, 设计的延迟器件在 350nm ~ 2000nm 的光谱范围内延迟量两次为 90° , 且最大延迟误差小于 0.04° 。与常规设计的延迟器件相比, 新设计的延迟器件不仅可以扩大消色差范围, 而且还可以大大提高消色差精度。这一结果对设计高精度 $\lambda/4$ 相位延迟器是有帮助的。

关键词: 光学器件; 消色差; 全反射; 高精度

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.036

Optimization of high precision rhomb-type achromatic retarders

LI Guo-liang¹, SONG Lian-ke², FAN Kai-min³

(1. Department of Physics, Xingyi Normal University for Nationalities, Xingyi 562400, China; 2. Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 3. Department of Physics and Engineering Technology, Sichuan University of Arts and Science, Dazhou 635000, China)

Abstract: In order to improve precision of rhomb-type achromatic $\lambda/4$ phase retarders, based on the positive and negative delay error of $\lambda/4$ phase retarders and larger refractive index, high precision retarders were designed. The retarder was analyzed and validated in experiments, and the data of high precision $\lambda/4$ phase retarder were obtained. It is shown at the retardation curve within the range of 350nm to 2000nm that retardation is 90° at two wavelengths and the maximal retardance error is smaller than 0.04° . Comparing with conventional retarders, the new retarder not only extends achromatic range, but also improves achromatic precision. The results are helpful to design high precision $\lambda/4$ phase retarders.

Key words: optical device; achromatism; total reflection; high precision

引言

相位延迟器是一种重要的光学器件, 是偏光类器件中的一个重要组成部分。器件通常按单波长设计而成, 只适用于某单一波长。对于较大光谱范围内的准确测量, 按单一波长设计显然是不合适的, 必须考虑到整个使用光谱范围的性能。消色差相位延迟器是一种对使用波长不敏感的光相位调制器件, 它可用多种方法制成, 例如可以用双折射随波长线性变化的材料或用双折射材料进行组合^[1-5], 也可以根据全内反射原理^[6-8]制成。全内反射型消色差延迟器由于对波长的依赖较小, 因而获得广泛的应用。部分资料^[9-10]显示可以利用材料的特性, 提高器件性能, 如利用 LaK2 玻

璃设计的 $\lambda/4$ 相位延迟器具有较宽的使用光谱范围和较高的消色差精度。通过分析全内反射原理设计的菱体型延迟器件, 作者对其进行优化设计, 使器件性能又有了很大改善。

1 消色差延迟器的优化设计

一束光水平射向如图 1 所示的长方体型器件, 发

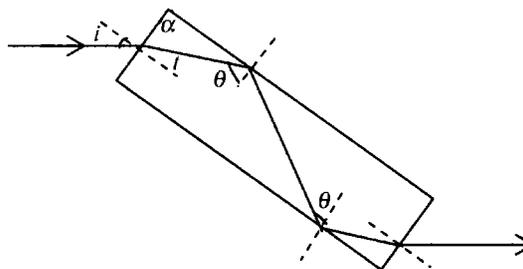


Fig. 1 Optical path in the rectangular parallelepiped phase retarder
生两次全内反射后水平射出, 全内反射角 θ 与入射角 i , 结构角 α 的关系如下式所示^[10]:

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

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

E-mail: liguolianglq@163.com

收稿日期: 2010-04-22; 收到修改稿日期: 2010-06-17

光束在器件内发生两次全内反射,产生的相位延迟 δ 与全内反射角 θ 及折射率 n 的关系如下式所示^[11-12]:

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

由(2)式可知,相位延迟 δ 不仅与全内反射角 θ 有关,而且依赖于材料的折射率。而折射率通常与光的波长有关,波长的改变引起折射率的变化,从而导致了相位延迟 δ 的改变,这是不希望发生的。为了尽量减缓这种变化,设计了消色差延迟器件。对(2)式整理可得:

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \left[(n^2 + 1) + (n^4 - 4n^2 C^2 - 2n^2 + 1)^{1/2} \right] / \left[2n^2 (C^2 + 1) \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

式中, $C = \tan(\delta/4)$, 对于要设计的 $\lambda/4$ 消色差延迟器件,相位延迟 δ 随着折射率 n 的增加先变大后变小,当相位延迟 δ 在最大值时,对折射率 n 的变化最不灵敏,有关系式 $d\delta/dn = 0$ 。为求出 $d\delta/dn$ 的表达式,由(2)式, δ 对 n 求导可得:

$$d\delta/dn = (\partial\delta/\partial n) + (\partial\delta/\partial\theta)(d\theta/dn) \quad (4)$$

由(2)式, δ 对 n 和 θ 分别求导可得:

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

$$\left[(n^2 \sin^2 \theta - \cos^2 \theta) (n^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2} \right] \quad (5)$$

$$\partial\delta/\partial\theta = 2n \sin \theta \left[\cos^2 \theta - (n^2 \sin^2 \theta - 1) \right] /$$

$$\left[(n^2 \sin^2 \theta - \cos^2 \theta) (n^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2} \right] \quad (6)$$

折射率 n 的变化引起全内反射角 θ 的变化,由(1)式, θ 对 n 求导可得 $d\theta/dn$ 的关系,如下式所示:

$$d\theta/dn = (\sin i) / [n(n^2 - \sin^2 i)^{1/2}] \quad (7)$$

将(5)式~(7)式代入(4)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:

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

利用(3)式、(8)式确定了 θ 和 i 之后,将其值带入(1)式便可得出所要设计器件的结构角 α 。

对于要设计的 $\lambda/4$ 消色差相位延迟器,取 δ 在最大值时对应的折射率 n_0 对器件进行设计。若令 δ 在设计点 n_0 处为 90° , 这样设计会使在整个光谱区域内相位延迟均偏向设计要求的下方,仅在设计波长点处 $\delta = 90^\circ$ 。能否利用某些手段使曲线的延迟误差从负偏差变成正负偏差,在整个光谱区域内有两个波长点同时达到 90° , 因此,可以令 $\delta = 90^\circ + \varepsilon$ (ε 为 $\lambda/4$ 消色差延迟器件在折射率 n_0 处偏离 90° 的大小), 这样不仅器件的消色差精度提高,消色差范围自然会加宽。这种方法的优点是可以通过对 ε 的选择对相位延迟的最大误差进行控制。当然也可以利用在两个折射率处 $\delta = 90^\circ$ 的方法对器件进行设计,但这样设计最大的缺点是延迟误差不好控制,因而不利于器件的设计。

2 n_0 的变化对消色差性能的影响

在器件的设计过程中,对设计点折射率 n_0 的选择就显得非常重要。为了得出 n_0 的不同取值对器件消色差性能的影响,取 $\varepsilon = 0.04^\circ$, 并分别在 n_0 为 1.7 和 1.8 的情况下对器件进行了设计,相位延迟随折射率变化如图 2 所示。

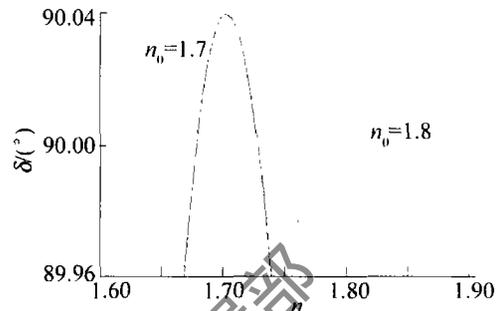


Fig. 2 Variation of δ with refractive index n

由图 2 中的曲线可以看出:相位延迟偏离 90° 最大为 0.04° , 当 $n_0 = 1.7$ 时,折射率在 1.67 到 1.735 变化,即 $\Delta n = 0.065$; 而 $n_0 = 1.8$ 时,折射率在 1.755 到 1.85 变化,即 $\Delta n = 0.095$ 。这说明随着器件设计点折射率 n_0 的增大,对于同一 ε , Δn 变大,即消色差区域变宽,说明 n_0 的增大有利于提高器件的消色差性能。

3 消色差延迟器的新设计

在器件的设计过程中,利用以下两个方法对器件进行新设计:(1)在设计点 n_0 处令 $\delta = 90^\circ + \varepsilon$, 使曲线的延迟误差为正负偏差,在整个光谱区域内有两个波长点相位延迟同时达到 90° , 提高器件的消色差精度;(2)选择较大的折射率设计点 n_0 来设计,也改善了器件的消色差性能。

作为设计特例说明,取 $\varepsilon = 0.04^\circ$, $n_0 = 1.69$, 用 LaK2 玻璃对 $\lambda/4$ 消色差延迟器进行再设计,这时 $i = 45.33^\circ$, $\alpha = 85.42^\circ$, 满足上述参量的延迟器件其延迟量 δ 在 350nm ~ 2000nm 的光谱区域内的延迟曲线,如图 3 所示。

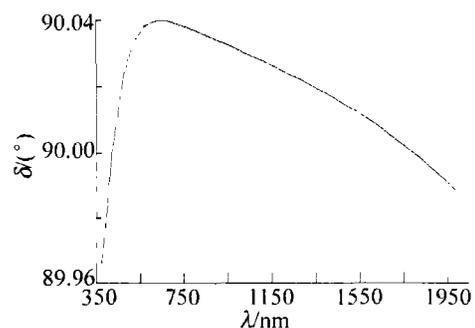


Fig. 3 Variation of δ with wavelength λ

由图 3 可以看出,经过重新设计的延迟器件其延迟量在 350nm ~ 2000nm 的光谱区域内两次为 90° , 且

最大延迟偏差小于 0.04° 。参考文献[9]中设计的特殊角度入射的延迟器件,在 $365\text{nm} \sim 1150\text{nm}$ 的光谱区域内最大延迟偏差为 0.4° ,与其相比,新设计的延迟器件由于经过两个方面的改进,不仅消色差范围变宽,而且消色差精度有了较大的提高。

4 误差分析

在实际使用中,由于器件的加工误差和外入射角微小偏差,都将影响器件的消色差精度。

首先,对材料的加工而言,现在已经有了很精密的加工技术,但仍存在一定的误差,实际角度加工的误差 $\Delta\alpha \leq 0.01^\circ$ 。当 $\Delta\alpha = 0.01^\circ$,其延迟量在 $350\text{nm} \sim 2000\text{nm}$ 的光谱区域内最大延迟偏差小于 0.08° ;即使加工误差 $\Delta\alpha = 0.05^\circ$ 时,最大延迟偏差也小于 0.19° 。

其次,在使用过程中,外入射角微小偏差也会对器件的延迟量产生影响。实际使用中外入射角的误差 $\Delta i \leq 0.02^\circ$ 。当 $\Delta i = 0.02^\circ$,其延迟量在 $350\text{nm} \sim 2000\text{nm}$ 的光谱区域内最大延迟偏差小于 0.1° ;即使误差 $\Delta i = 0.1^\circ$ 时,最大延迟偏差也小于 0.2° 。

综合考虑器件的加工误差和外入射角微小偏差对器件消色差精度的影响,当 $\Delta\alpha \leq 0.01^\circ$ 和 $\Delta i \leq 0.02^\circ$ 时,其延迟量在 $350\text{nm} \sim 2000\text{nm}$ 的光谱区域内最大延迟偏差小于 0.09° 。即使误差达到 $\Delta\alpha = 0.05^\circ$ 和 $\Delta i = 0.1^\circ$ 时,其延迟量最大延迟偏差也小于 0.31° 。参考文献[9]中设计的特殊角度入射的延迟器件,在 $365\text{nm} \sim 1150\text{nm}$ 的光谱区域内理论上最大延迟偏差为 0.4° ,与其相比,新设计的器件具有极大的优越性。

5 结论

在设计菱体型消色差 $\lambda/4$ 延迟器件时,由于使延迟误差为正负偏差,在整个光谱区域内有两个波长点相位延迟同时达到 90° ;同时选择较大的折射率设计点 n_0 来设计,因此延迟器的性能有了较大提高。相比

常规延迟器,不仅扩大了消色差范围,而且提高了消色差精度。采用LaK2玻璃新设计的延迟器件,其延迟曲线显示,在 $350\text{nm} \sim 2000\text{nm}$ 的光谱区域内延迟偏差小于 0.04° ,且延迟量在两个波长处为 90° ,消色差精度有了较大的提高。当然,在实际使用中为获得更好的消色差精度,应尽量减小器件的加工误差和外入射角入射偏差。

参考文献

- [1] JEAN-BAPTISTE M, GUILHEM G. Terahertz chromatic quarter waveplates[J]. Applied Optics, 2006, 31(2):265-267.
- [2] McINTYRE C M. Achromatic waveplates for the visible spectrum[J]. Journal of the Optical Society of America, 1968, 58(12):1575-1580.
- [3] CHUN Y. Construction of an optical rotator using quarterwave plates and optical retarders[J]. Optical Engineering, 1995, 34(10):3031-3035.
- [4] SONG L K, LI G H. Design of the three-element combination achromatic retarder made of mica and quartz[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2000, 11(1):51-53(in Chinese).
- [5] YUN M J, LI G H, WANG W, et al. Three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12(6):562-564(in Chinese).
- [6] LI J Zh. Optical handbook[M]. Taiyuan: Science and Technology Press of Shanxi, 1986:576-580(in Chinese).
- [7] LI G L, SONG L K, HAO D Zh, et al. Optical design of rhomb-type achromatism retarder[J]. Laser Technology, 2006, 30(5):539-540(in Chinese).
- [8] LI G L, SONG L K, HAO D Zh, et al. Sensitivity of rhomb-type phase retarders to the input angle[J]. Laser Technology, 2008, 32(2):157-158(in Chinese).
- [9] 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).
- [10] WANG X, WU F Q, LIANG Zh X. A new $\lambda/4$ phase retarder insensitive to the angle of incidence[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2000, 11(2):154-156(in Chinese).
- [11] NAGIB N N. Phase retarders with variable angles of total internal reflection[J]. Applied Optics, 1994, 33(7):1218-1222.
- [12] NAGIB N N. Phase retarders highly insensitive to the input angle[J]. Applied Optics, 1998, 37(7):1231-1235.
- [4] HOU X, WU F, YANG L, et al. Effect analysis of edge errors in wavefront fitting with zernike polynomials[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(s2):89-94(in Chinese).
- [5] DUAN H F, YANG Z P, WANG Sh Q, et al. Model wavefront reconstruction of Shack-Hartmann sensor on arbitrary area and wavefront expression by zernike polynomials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(6):66-70(in Chinese).
- [6] YANG P, AO M W, LIU Y, et al. Adaptive optics genetic algorithm based on zernike mode coefficients[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3):11-16(in Chinese).
- [7] HOU X, WU F, YANG L, et al. Optimum analysis of seidel aberrations calculated with Zernike circle polynomials for the obscured aspherical primary mirror[J]. Journal of Optoelectronics · laser, 2006, 17(5):568-572(in Chinese).
- [8] LIU J P, LIANG L P, JIN Sh L, et al. Testing large curvature surface of optical element with spatial carrier heterodyne interferometry[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1):134-139(in Chinese).
- [9] WANG F G, YANG H B, LI H Zh, et al. Application and algorithm research of active optics in thin mirrors[J]. Infrared Technology, 2007, 29(12):704-707(in Chinese).
- [10] QI Y Ch, AN Y, JIN G, et al. Optical/mechanical integration of hyper-thin membrane mirror with large aperture[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(5):563-565(in Chinese).
- [11] WANG Zh Y, WU Zh H. Using binary optical phase plate to correct the error of interferometer[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1995, 6(6):369-375(in Chinese).

(上接第274页)